

ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR PLANAR

Sebastián Guarín Restrepo

Dirigido por: Alexander Molina Cabrera

Universidad Tecnológica de Pereira

Noviembre 2019

Agradecimientos.

A mi familia: mis padres, mis abuelos y mi hermano, quienes han estado acompañándome desde el inicio de este proceso, quienes han sido motor de mi motivación y sin cuyo soporte incondicional no estaría en este punto de mi carrera.

A mi director de tesis, por su paciencia, constancia e interés, por sus aportes a mi desarrollo como ingeniero, investigador y ser humano y por todo el apoyo a mis proyectos de crecimiento personal.

Al ingeniero Sergio Velarde, cuya amable asistencia fue fundamental para el diseño y construcción del prototipo.

A mis compañeros Edwin Galeano, Edwin Sánchez y Erik Santos, quienes fueron colaboradores constantes de los diferentes proyectos personales y académicos que estoy llevando a cabo, entre los que se encuentra mi proyecto de grado.

Índice

Resumen.....	3
Introducción	3
Objetivos	4
1. Transformador Convencional.....	5
1.1 Leyes de Maxwell	5
1.2 Materiales Magnéticos.....	7
1.3 Circuito Magnético.....	7
1.4 Transformador Eléctrico.....	9
1.5 Tipos de transformadores	13
2 Transformador Planar	13
2.1 Introducción	13
2.2 Transformador Planar vs Transformador enrollado	14
2.3 Desventajas del Transformador Planar	18
2.4 Devanado del Transformador Planar	19
2.5 Núcleo del Transformador Planar	24
3 Desarrollo del prototipo.....	28
3.1 Núcleos de ferrita de tipo EQ.....	28
3.2 Devanados.....	32
3.3 Montaje y cableado.....	36
3.4 Resultados experimentales: Transformación de tensión.....	37
4 Simulación multifísica.....	40
4.1 Construcción de la geometría	40
4.2 Asignación de parámetros y variables.	42
4.3 Configuración del Estudio: Campos Magnéticos y circuito eléctrico	43
4.4 Asignación de Materiales	44
4.5 Generación del mallado	46
4.6 Resultados de la simulación.	46
5 Conclusión	48

Resumen

En un principio se realiza un barrido informativo general del transformador clásico, predecesor directo del transformador planar. Posteriormente se comparan el transformador planar con el de núcleo enrollado enumerando ventajas, desventajas y características de diseño. A continuación, se abordan las características de los componentes principales del transformador planar: el núcleo y los devanados, analizando variaciones importantes existentes con base en los desarrollos científicos ya existentes en la literatura. Paso seguido, se explica cómo se realizó la construcción del prototipo, desde el diseño y construcción de los devanados y núcleos, hasta su estructuración y puesta en marcha bajo condiciones de laboratorio, sumados a la posterior obtención de mediciones concluyentes. Finalmente se explica cómo fue el proceso de simulación desde la construcción de la geometría hasta la obtención de resultados satisfactorios donde se muestra la variación del flujo magnético y el comportamiento de la corriente en los devanados.

Introducción

Los transformadores planares son dispositivos ampliamente usados en el mundo actual, se les puede encontrar en la industria aeronáutica y aeroespacial, en aplicaciones de medicina, en movilidad eléctrica y en sistemas embebidos en general. La motivación detrás de este desarrollo se encuentra principalmente en su tamaño compacto, lo que facilita su introducción en circuitos electrónicos como aquellos de los que están compuestos los convertidores.

En las últimas décadas se han venido haciendo necesarias actualizaciones al sistema eléctrico debido al crecimiento poblacional, a la necesidad de realizar la transición a las energías renovables a causa del cambio climático y al surgimiento de nuevas formas de generación energética. Además de ello, el transporte también ha estado cambiando, particularmente de manera drástica en los últimos años con el mismo motivo: la reducción del uso de energías fósiles y/o contaminantes, hacia lo que hoy es ampliamente conocido como movilidad eléctrica. Es dentro de este esquema que el transformador planar se vuelve un elemento importante para esa transición; las nuevas formas de energía renovable estarán particularmente ligadas a los cambios climáticos y necesitarán sistemas de control más robustos, que no estarán necesariamente en el clásico esquema energético de generación-transmisión-distribución, puesto que con el desarrollo de los Smart Grids y la generación distribuida, se plantea una estructura completamente diferente a la que el transformador planar se puede adecuar por sus características y por la investigación constante a la que está ligado por la comunidad científica internacional.

A pesar de que hoy en día el transformador planar concierne constantes investigaciones a nivel global, en la comunidad hispanohablante no existe mucha información al respecto ya que la mayoría de los desarrollos y escritos se realizan en inglés. Es este otro de los motivos por el cual se realiza esta investigación, un modelamiento teórico – práctico de este dispositivo permite aumentar la comprensión de estos dispositivos, y más allá de eso, fomenta la producción científica y el desarrollo investigativo con énfasis en esta tecnología no solo en nuestra comunidad universitaria, sino también en otras áreas que lo requieran. La revisión bibliográfica permitirá en un primer lugar

entender las bases del comportamiento del transformador y las motivaciones para su desarrollo, la simulación aterrizará esas ideas a un plano mas tangible y finalmente la creación del prototipo permitirá evidenciar resultados concluyentes respecto a las distintas hipótesis planteadas al inicio del trabajo investigativo. En todo este proceso hay componentes especiales de aprendizaje que ayudan al desarrollo del ingenio y a la capacidad de generar conocimiento, dos características fundamentales de cualquier científico.

Objetivos

Objetivo General

- Construir y analizar un prototipo de transformador planar.

Objetivos Específicos

- Realizar búsqueda bibliográfica que permita generar un marco teórico adecuado en lo que respecta a los materiales usados para la construcción del transformador.
- Revisar referencias enfocadas a las diferentes configuraciones usadas para el núcleo del transformador planar.
- Simular el prototipo de transformador planar.

1. Transformador Convencional.

1.1 Leyes de Maxwell

La teoría electromagnética desarrollada por James Clerk Maxwell fue inspirada en los experimentos que realizó Michael Faraday sobre campo eléctrico y magnético y otros trabajos experimentales y teóricos de años anteriores de Ampère, Oersted etc. Este último introdujo el concepto de campo y líneas de campo, sin embargo, sus estudios no tenían fundamentación matemática, por lo cual no eran aceptados por la comunidad científica.

En 1856, Maxwell publicó “On Faraday’s lines of force” y más tarde en 1861, publicó “On Physical Lines of Force”. En estos artículos proporcionó un complejo modelo mecánico que explicaba los fenómenos eléctricos y magnéticos. 4 años después de su última publicación, realizó la publicación de otro artículo llamado “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”. Este último artículo contiene las expresiones conocidas como “Las Ecuaciones de Maxwell” y la “Teoría Electromagnética de la luz”.

En principio Maxwell formuló un conjunto de 20 ecuaciones conocidas como “Ecuaciones Generales del Campo Electromagnético” que fueron expresadas en coordenadas cartesianas. Dado que para ese entonces, no se había desarrollado el análisis vectorial, dicho conjunto de ecuaciones no podía ser reducido. Fue solamente hasta el año 1884 en el que Oliver Heaviside, haciendo uso del análisis vectorial, sintetizó las 20 ecuaciones en solo 4 ecuaciones, como se muestra a continuación: [1]

Ley de Gauss para Campo Eléctrico.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon}$$

Ecuación 1 - Ley de Gauss para Campo Eléctrico.

Los experimentos de Faraday dieron a conocer al mundo científico que una carga eléctrica puede generar un campo eléctrico en su vecindad, además, la existencia de dicho campo puede ser comprobada por las líneas de fuerza que nacen en una carga eléctrica. La fuerza eléctrica está determinada por dichas líneas, y será mayor a medida que la intensidad del campo eléctrico aumente. El flujo eléctrico está determinado por la cantidad de líneas que salen de una carga eléctrica.

Esta ley evalúa la presencia de carga en un punto del espacio por medio de una superficie cerrada. [2]

Ley de Gauss para Campo Magnético

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

Ecuación 2 - Ley de Gauss para Campo Magnético.

El estudio de la segunda ecuación de Maxwell está estrechamente relacionado con la primera ecuación, sin embargo y a diferencia de la primera, están involucrados el vector de densidad de campo magnético y un diferencial de línea de la trayectoria analizada.

Esta ecuación hace un análisis de las líneas de fuerza de campo magnético, con ella se entiende en donde nacen y donde mueren, no obstante, existe una diferencia considerable cuando se compara con la primera ecuación: si bien las líneas de fuerza de campo eléctrico dependen de la carga encerrada por la superficie y de su naturaleza que definía donde nacían y morían las líneas de fuerza, para la segunda ley de Maxwell, la integral es igual a cero lo cual indica que las líneas de fuerza mueren en el mismo lugar donde nacen, es decir, las líneas de fuerza magnética se cierran sobre sí mismas. [2]

Ley de Inducción de Faraday

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Ecuación 3 - Ley de Inducción de Faraday.

Faraday realizó un experimento bajo la siguiente premisa: si una corriente eléctrica puede generar un campo magnético entonces es posible que un campo magnético genere una corriente eléctrica. Para comprobar esto, Faraday usó un anillo conductor y enrolló cables en ambos lados del anillo, en un extremo colocó un amperímetro y en el otro una pila que tenía la posibilidad de conectar y desconectar por medio de un conmutador.

Cuando cerró por primera vez el circuito observó que no se generó corriente continua, sin embargo, logró ver que se generaba una instantánea cada vez que abría y cerraba el circuito. La ecuación muestra que el cambio del campo magnético con respecto al tiempo puede generar un campo eléctrico, el signo negativo que acompaña la derivada muestra que el campo eléctrico generado siempre estará en dirección contraria a la que esté el campo magnético. Ambos campos son complementarios, es decir, no se puede hablar de campo magnético sin la presencia de un campo eléctrico y viceversa, además estos campos son siempre perpendiculares entre sí. [2]

La ley de Ampere-Maxwell

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I + \mu \epsilon \frac{d}{dt} \vec{E}$$

Ecuación 4 - Ley de Ampere-Maxwell.

La corriente eléctrica genera un campo magnético, como se explicó anteriormente. A medida que esta corriente aumenta, la densidad del campo lo hace, tal como se evidencia en el primer término a la derecha del igual. El segundo término está asociado a la generación de un campo magnético debida a la variación de la corriente. Variación del campo magnético.

La densidad de campo magnético será igual a la corriente que circula por el conductor considerando además la variación del campo eléctrico respecto al tiempo. [2]

1.2 Materiales Magnéticos.

Un material magnético es aquel material que posee un momento magnético o, en otras palabras, que sus átomos se comportan como imanes muy pequeños. En general se pueden encontrar en la naturaleza 4 tipos de materiales magnéticos:

- **Diamagnéticos:** Son aquellos materiales que no poseen momento magnético por lo tanto no puede generarse en ellos un campo magnético remanente cuando se exponen a un campo magnetizante.
- **Paramagnéticos:** A nivel atómico, existen en algunos materiales unos dominios magnéticos que muestran las propiedades magnéticas del mismo, sin embargo, para este tipo de material, inicialmente dichos dominios apuntan en direcciones diferentes por lo cual su contribución individual se anula. Luego, para poder generar en este material un campo magnético remanente, será necesario orientar los dominios con un campo magnético externo, como resultado de esto, los dominios se ordenarán en la dirección del campo magnetizante y se generará una imantación.
- **Ferromagnéticos:** Este tipo de materiales poseen una respuesta rápida a campos magnéticos externos por lo cual se hace fácil orientar los dominios magnéticos que poseen. Como resultado de ello se generará un campo magnético remanente con mayor facilidad en dicho material, debe tenerse en cuenta que este tipo de materiales son metálicos por lo general, no obstante, existen excepciones como la Ferrita que, aunque tiene el mismo comportamiento, posee una conductividad eléctrica mucho menor que la de los metales. [3]

1.3 Circuito Magnético.

De las leyes de Maxwell, Ley de Ampere-Maxwell y la Ley de inducción de Faraday son las que modelan el comportamiento del transformador.

Para su análisis, es necesario entender el comportamiento del circuito magnético, realizando una analogía con los circuitos eléctricos:

Un circuito eléctrico básico está conformado por una fuente de voltaje, una trayectoria por la que circule la corriente y una carga, que puede tener diferente naturaleza (Resistiva, Capacitiva,

Inductiva). Los circuitos magnéticos tienen la misma estructura, sin embargo, no se habla de voltaje sino de fuerza magnetomotriz, tampoco se habla de resistencias, sino de reluctancia. Ahora bien, supóngase que se tiene el sistema de la **Ilustración 1**.

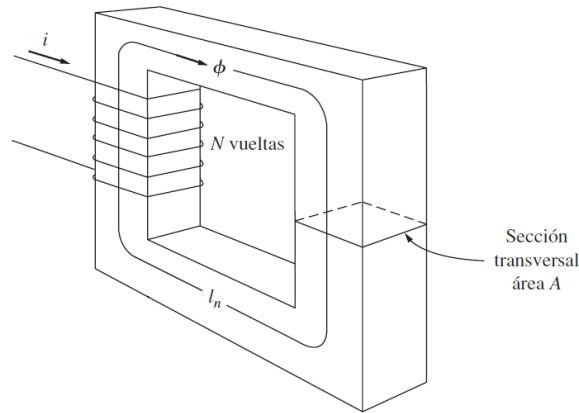


Ilustración 1 - Transformador Ideal. Tomado de [4]

Como se puede observar hay una corriente i circulando por la bobina del brazo izquierdo del núcleo, debido a la circulación de esta se producirá un campo magnético y , además, por el núcleo ferromagnético existirá flujo magnético. El objetivo en la construcción del transformador es asegurar que la mayor cantidad de flujo magnético pueda circular por el núcleo y obtener un alto porcentaje de inducción cuando se ubique otra bobina en el brazo derecho del núcleo. Es por ello que se realiza el análisis usando circuitos magnéticos, para el cálculo de este flujo magnético que está dado por: [5]

$$\phi = BS \quad \text{Ecuación 5}$$

La relación entre B y H está dada por la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y el flujo magnético en función de la reluctancia y la fuerza magnetomotriz por la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**:

$$B = \mu H \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\phi = \frac{Fmm}{R} \quad \text{Ecuación 7}$$

La permitividad magnética del material es finita y por ello una cantidad del flujo magnético se escapará por el aire. Por su parte, la reluctancia es inversamente proporcional a la permeabilidad, lo cual significa que al usar materiales muy permeables se producirá una reluctancia menor y por lo tanto el flujo magnético circulará con mayor fluidez.

Para núcleos de gran tamaño, será necesario tener un área efectiva grande y una buena permeabilidad magnética para evitar reluctancias grandes.

Si bien los materiales ferromagnéticos ofrecen ventajas favorables en comparación con otro tipo de materiales, esto no significa que no existan pérdidas de energía en el proceso de inducción de energía, sin embargo, las magnitudes de esas pérdidas no son tan grandes como las que se podrían tener en otro tipo de material.

En conclusión, la función de los circuitos magnéticos es básicamente simplificar el análisis del flujo magnético en los núcleos de los diferentes tipos de materiales magnéticos. Para nuestro caso, el análisis se realizó para un material ferromagnético. [4] [5]

1.4 Transformador Eléctrico.

Un transformador eléctrico es una máquina eléctrica estática, su funcionamiento se puede explicar por medio de la ley de Inducción de Faraday y la Ley de Ampere-Maxwell.

El transformador cumple con la función básica de elevar o disminuir los niveles de tensión que tienen una cantidad de potencia eléctrica. En términos constructivos, son arrollamientos de cable dispuestos sobre un núcleo ferromagnético y que no tienen una conexión física entre ellos, existen arreglos de hasta 3 arrollamientos.

La función que cumplen los transformadores es fundamental dentro del esquema de funcionamiento de la red eléctrica. El sistema eléctrico de potencia está dividido en 4 etapas: Generación, Transmisión, Subtransmisión y Distribución. Durante esos procesos se hace necesario que la magnitud de la tensión deba cambiar y para tal propósito es hoy indispensable el uso de los transformadores.

En la actualidad, para la construcción de los núcleos se usan láminas de acero al silicio debido a su alta permeabilidad magnética, el material se lamina para reducir las pérdidas por corrientes parásitas o corrientes de Eddy, sin embargo, no puede existir una separación muy grande entre láminas para evitar entrehierros y por lo tanto un flujo de dispersión muy alto.

Respecto a las bobinas, que son arrollamientos de cable, en general se usa cobre por sus buenas propiedades de conductividad eléctrica y dependiendo de la cantidad de corriente que soportará ese conductor, su calibre puede cambiar. Cabe aclarar que para el lado de baja tensión será necesario usar siempre conductores de calibres bajos los cuales son quienes soportan corrientes grandes. La disposición de los devanados en el núcleo se puede catalogar en dos tipos:

- **Tipo Núcleo:** Llamados así debido a que los devanados están ubicados en cada brazo del núcleo. Este tipo de topología ofrece una desventaja debido a que el flujo de dispersión es grande.
- **Tipo Acorazado:** En este tipo de construcción los devanados son ubicados uno encima del otro, ambos devanados deben ir aislados con respecto al núcleo, entre ellos y también debe existir un aislamiento para las vueltas de cada arrollamiento. Con este tipo de topología se gana eficiencia en cuanto al flujo concatenado por la bobina secundaria. [4]

Transformador Ideal.

Para entender el comportamiento básico del transformador, se asumirá inicialmente que este no tiene ningún tipo de pérdidas en términos de potencia eléctrica. En la **Ilustración 2**, se muestra el diagrama de un transformador ideal, el flujo magnético generado por la acción de ambas corrientes se quedará en su mayoría en el núcleo ferromagnético.

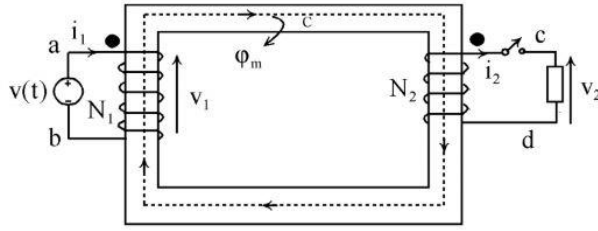


Ilustración 2 – Circuito equivalente del Transformador Ideal. Tomada de [6]

El extremo donde está conectada la fuente de tensión variable se considera como primario, y el otro, secundario. Debido a la circulación de corriente por la bobina primaria, se producirá un campo magnético variable y además existirá flujo magnético, que circulará por el núcleo. Por ley de Ampere, en el conductor de la bobina secundaria se producirá corriente y también se va a generar un campo magnético. [5]

La relación de transformación está definida por:

$$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2} = a \quad \text{Ecuación 8}$$

Para el transformador ideal, se sabe que los ángulos son iguales tanto en el primario como en secundario, por lo tanto $\theta = \theta_p = \theta_s$, en otras palabras, el transformador tiene el mismo factor de potencia tanto en alta como en baja, así:

$$P_{sal} = V_p * I_p * \cos(\theta) = P_{ent} \quad \text{Ecuación 9}$$

De lo anterior, se puede concluir que la potencia de entrada de un transformador ideal es igual a la potencia de salida. [4] [5]

Transformador Real

Para el transformador real se consideran las pérdidas por calor y por histéresis. Estas consideraciones, harán que la topología del circuito tenga elementos adicionales y que la potencia de salida del transformador difiera de la potencia de entrada puesto que, aunque los voltajes inducidos pueden iguales, las relaciones entre corriente variarán.

La **Ilustración 3** muestra un esquemático del comportamiento de las líneas de campo magnético y muestra que no todo el flujo es concatenado por las bobinas.

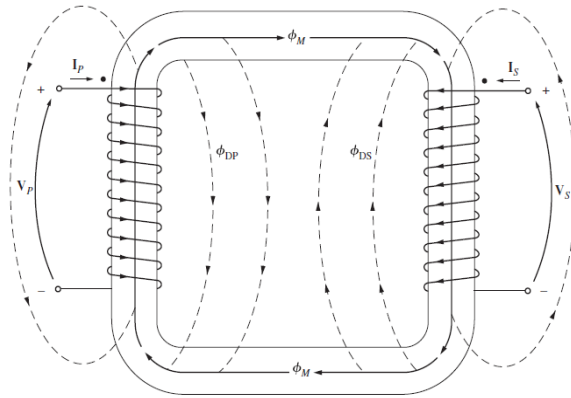


Ilustración 3 – Flujo magnético en el núcleo, tomado de [6]

Circuito Equivalente de un Transformador Eléctrico.

Con fin de construir un modelo equivalente exacto del transformador real es necesario tener presente los siguientes 3 aspectos:

1. Las pérdidas en el cobre causadas por el calentamiento debido al flujo de electrones.
2. Las pérdidas por corrientes parásitas que causan calentamiento en el núcleo del transformador.
3. Pérdidas por histéresis, relacionadas con la magnetización del material.
4. Flujo de dispersión.

Se considera en primer lugar el efecto de pérdidas por calor en el cobre, para lo cual solo será necesario agregar una resistencia por bobina, como se ve en la Ilustración 4 [6]

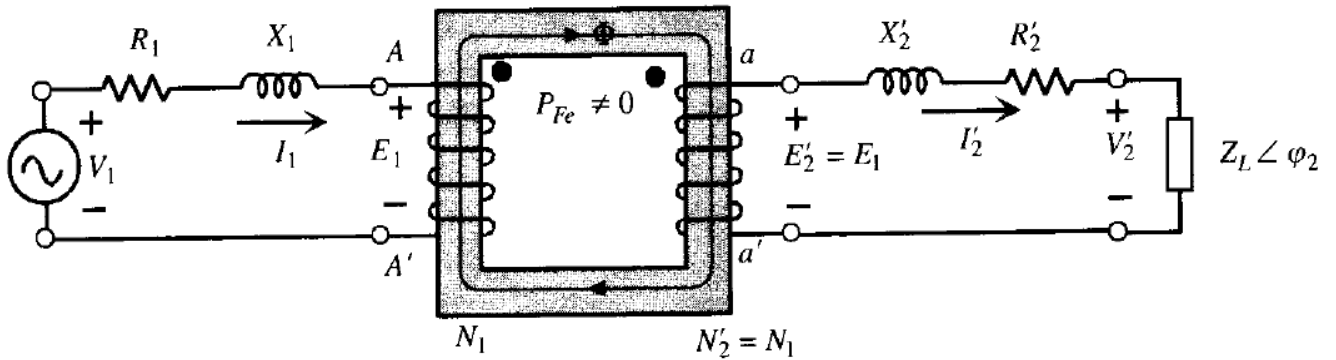


Ilustración 4 – Circuito equivalente considerando las pérdidas por calentamiento y flujos de dispersión, tomada de [6]

La corriente de magnetización es proporcional al voltaje aplicado en la región no saturada, además, tiene un retraso de 90° respecto a este, y se puede modelar como una reactancia inductiva X_m . La resistencia R_n modela las pérdidas en el núcleo y las corrientes por histéresis. Es necesario resaltar que las corrientes por pérdidas en el núcleo y por histéresis son corrientes no lineales.

Se llega entonces al circuito equivalente real del transformador que se muestra en la Ilustración 5. [6]

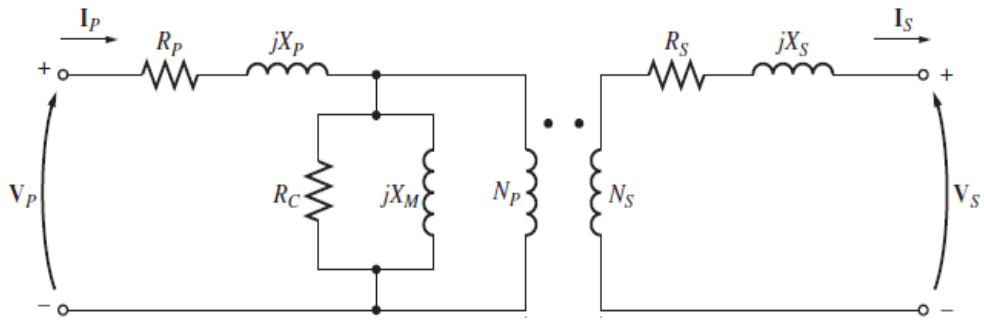


Ilustración 5, tomada de [6]

Utilizar el circuito equivalente para realizar cálculos puede llegar a ser complejo, por lo tanto, puede referirse el bobinado secundario al primario o viceversa y de ese modo los cálculos serán más simples. A continuación, se demuestran las ecuaciones para realizar dicho proceso. Para este caso, se referirá el secundario al primario como se muestra en la Ilustración 6:

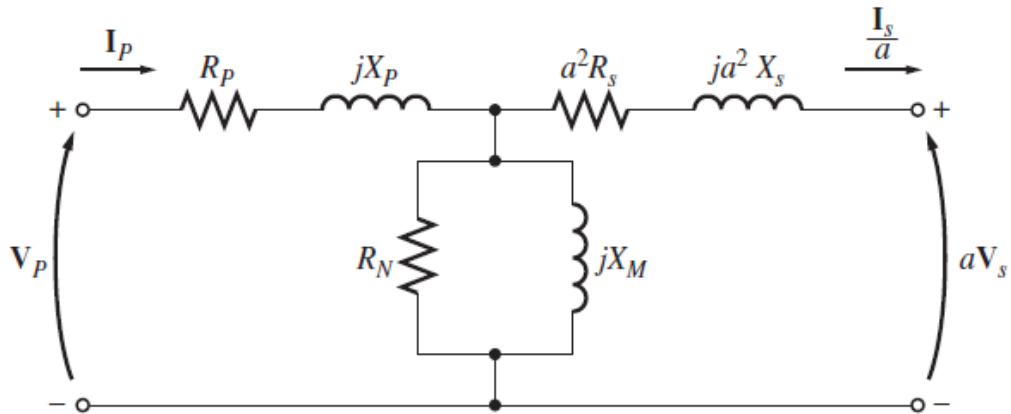


Ilustración 6 - Circuito equivalente referido al primario, tomada de [6]

1.5 Tipos de transformadores

Existen varios tipos de transformador con muchas aplicaciones que se pueden clasificar según su nivel de tensión, el material del núcleo, la disposición de los devanados, el lugar de instalación, su uso, etc.

En la **Ilustración 7** se pueden ver de manera superficial los tipos de transformador más comunes.



Ilustración 7 - Tipos de transformador. Tomado de [7]

Dentro de los transformadores de potencia, particularmente de entre aquellos con núcleo de ferrita, se encuentra el transformador planar, dispositivo en el cual se centrará este documento.

2 Transformador Planar

2.1 Introducción

El tema de los inductores y transformadores planares no es reciente, de hecho, es algo que se viene trabajando desde hace algunas décadas. En 1967, ya se tocaba el tema de manera casi directa cuando R. Drapeau proponía un Transformador de líneas de transmisión de tipo planar (o *grabado*, como fue llamado en el documento), debido a las ventajas que este presentaba respecto a su contraparte de circuito enrollado, como relaciones de transformación de hasta 256 a 1, tiempos de subida mejores a 1 ns y frecuencias de alrededor de 100kHz, sin embargo la topología de esta

propuesta aún estaba lejos de lo que es el transformador planar hoy en día, como se puede observar en la Ilustración 8 . [8]

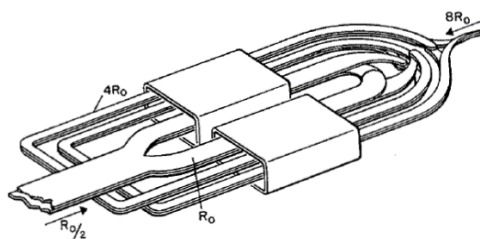


Ilustración 8 – Transformador de línea de transmisión grabado.

Después, en 1986, una patente fue desarrollada por Alexander Estrov, titulada “Fuente de alimentación eléctrica conmutada utilizando inductores miniatura integrados en un PCB” (*Switching electrical power supply utilizing minature inductors integrally in a PCB*) que podría ser considerado uno de los antecesores oficiales de lo que se conoce hoy como transformador o inductor planar. En el documento de la patente se menciona, como una de las razones principales, la preponderancia que estaban comenzando a tomar los microcomponentes en esta época y de cómo en el futuro las fuentes de alimentación para microprocesadores (y similares) contendrían más que nada elementos lógicos como los componentes semiconductores en forma de circuitos integrados. De la misma forma, se resalta la utilidad de su invención en particular con los elementos que manejan potencia y en los límites de costo, tamaño y conveniencia que existen en la miniaturización de estos. [9]

Por su parte, en 1988, O. Oshiro y su equipo, describían de manera más directa la estructura de un transformador planar y sus componentes como parte de su investigación en transformadores de altas frecuencias. [10]

2.2 Transformador Planar vs Transformador enrollado

Este tipo de transformador es de alto interés para la comunidad científica y en particular para la industria eléctrica. En su página web, Payton Magnetics (que tiene un área dedicada exclusivamente a la construcción de transformadores planares) enuncia cuales son las características que hacen de un transformador planar un elemento de tanta importancia en la actualidad: su diseño compacto, la operación en altas frecuencias (típicamente por encima de 100 kHz), bajas fugas de inductancia y la eliminación del efecto piel (o efecto pelicular). A medida que la industria requiere de más eficiencia, rendimiento y miniaturización, el transformador planar emerge como una alternativa bastante competitiva a los transformadores con bobinas enrolladas. [11]

Existen muchas características que diferencian a los transformadores planares de los convencionales. Durante décadas, estas han sido estudiadas a fondo con el fin de establecer las ventajas del uno sobre el otro para ciertos tipos de aplicación, como lo realizó el Payton Group para sus prototipos. En su artículo sobre los *beneficios de los elementos planares en la conversión de potencia a altas frecuencias*, el profesor Sam Yaakov enunciaba diferencias importantes como la geometría del bobinado de ambos, en el transformador planar ésta se realiza, como su nombre lo indica, en tarjetas PCB o circuitos impresos que son *planos*, mientras que en el clásico se realiza con

conductores (por lo general hechos de hilos de Litz o bien, de hilo sólido). Por otro lado, la relación existente entre ferrita y cobre difiere en ambos casos. Para el transformador planar el núcleo contará con una sección transversal más grande, a cambio de un menor número de vueltas para el bobinado. Esta relación inversamente proporcional se evidencia en la Ecuación 10 [12].

$$B = \frac{e K_d}{n A_e} \quad \text{Ecuación 10, tomada de [12]}$$

Donde:

B = Densidad de flujo magnético

n = Numero de vueltas

A_e = Área transversal efectiva del núcleo

e = Excitación; V-s (para transformadores) o A-H (para inductores)

K_d = constante dimensional.

De manera que, a mayor área transversal, más pocas vueltas podrá tener el bobinado del PCB.

Área Producto

Los transformadores tienen una característica muy importante en lo que tiene que ver con su diseño llamada **Área Producto**, y los TP no son una excepción. Este parámetro, expresado por lo general en cm^4 , representa el producto entre el área de la ventana del circuito Magnético y el área transversal del núcleo:

$$A_P = A_w A_e$$

Más allá de esto, su significancia se debe a la relación que tiene con la potencia nominal y con la densidad de corriente tanto en el primario como en el secundario, además de que también se puede relacionar con la energía que puede manejar el núcleo. El área Producto es un factor fundamental para el diseño del núcleo del transformador, y se puede expresar en función de distintas variables, dependiendo del autor.

En el curso de diseño de **transformadores monofásicos** de la Universidad de Navarra, este factor está expresado así [13]:

$$A_P = \left[\frac{10000 S_N}{4.44 \left(\frac{x}{x+1} \right) k_h k_w k_J f B_m} \right]^{\frac{8}{7}} \quad \text{Ecuación 11, tomada de [13]}$$

Donde:

- A_P el área producto
- S_N la potencia nominal del transformador (VA).
- f la frecuencia en (Hz).
- B_{max} , el valor de pico de la inducción (T). Podrá ser 1 T, en el caso de chapa normal (espesor 0.50 mm), o 1.36 T, si se elige chapa de bajas pérdidas (espesor 0.35 mm).

- k_h coeficiente o factor de apilamiento del núcleo. El área transversal real de hierro será $A_e = k_h A_c$. Es aproximadamente igual a 0.95.
- k_w coeficiente o factor de relleno de ventana. El área real de cobre será $A_{cu} = k_w A_w$. Tiene valores comprendidos entre 0.4 y 0.6.
- x , el coeficiente de densidad de corriente: $J_1 = xJ$; $J_2 = J$, donde J_1 es la densidad de corriente del primario y J_2 la del secundario. Se puede tomar $x=1$ en primera instancia; al rehacer los cálculos se puede ver si interesa realmente que $J_1 \neq J_2$.
- k_J constante de calentamiento: vale 366 para 25 °C, 534 para 50 °C y 603 para 60 °C.

Los valores aproximados mencionados en el curso de la Universidad de Navarra aplican para transformadores monofásicos.

En su tesis de maestría, *Diseño de transformadores planares para un convertidor LLC*, Vigneshwaran Gurusamy presenta otra forma para A_P , que describe como un valor necesario para escoger un núcleo magnético para una aplicación deseada [14]:

$$A_P = \left[\frac{\sqrt{k_w(1+k_{loss})L_m I_{pri} I_{mpk}}}{B_m k_d k_{wpri} \sqrt{\Delta T}} \right]^{\frac{8}{7}} \quad \text{Ecuación 12, tomada de [14]}$$

Donde:

- I_{mpk} corriente pico de magnetización
- I_{pri} corriente en el primario
- L_m Inductancia de magnetización
- k_{loss} factor de pérdidas, que relaciona las pérdidas del cobre, P_{dc} con las pérdidas totales.
 $P_{total} = (1 + k_{loss})P_{dc}$
- k_w factor de utilización de la ventana. Relaciona el área de conducción de los conductores A_{cond} con el área de la ventana del núcleo A_v , así: $k_v = \frac{A_{cond}}{A_v}$
- ΔT aumento de la temperatura permitido para el diseño
- k_{wpri} factor de utilización de la ventana para el devanado primario, definido por: $k_{wpri} = \frac{1}{(1 + \frac{2I_{sec}}{nI_{pri}})}$
- k_d es un parámetro dimensional del núcleo, con valor de $48.2 * 10^3$ obtenido con base en el análisis de varios tipos y tamaños de núcleos en el documento.

En contraste, el equipo del departamento de ingeniería eléctrica del instituto de tecnología de Madras, en India, llevó a cabo una investigación en el diseño de TPs con baja capacitancia intrínseca. En su documento, se habla de la **selección** de la geometría del núcleo basado en el A_P del

núcleo, que debería ser capaz de manejar la energía requerida y las propiedades del material del núcleo [15]:

$$A_e A_w \geq \frac{L_{pri} I_{pripk} I_{prirms}}{k_w B_m J} \quad \text{Ecuación 13, tomada de [15]}$$

Donde:

- L_{pri} es la inductancia del primario.
- I_{pripk} es la corriente pico del primario
- I_{prirms} es la corriente rms del primario

En el 2004, un manual de diseño de transformadores e inductores fue publicado por la editorial Marcel Dekker. El capítulo 20 de este manual, que está enfocado en el diseño de transformadores e inductores planares se describe un proceso completo de construcción y diseño de varios prototipos con recomendaciones y énfasis en los puntos más importantes de tal procedimiento. El A_p también se menciona en este documento como un factor de diseño de alta importancia para el manejo de potencia y energía por parte del núcleo:

$$A_p = \frac{P(10^4)}{k_f k_w A_c f B_m J} \quad \text{Ecuación 14, tomada de [16]}$$

$$A_p = \frac{2(Energía)}{k_w J B_m} \quad \text{Ecuación 15, tomada de [16]}$$

Donde:

- P es el manejo de potencia por parte del núcleo
- k_f Es una constante de construcción del transformador, típicamente 4.44
- k_w es el factor de relleno de la ventana
- A_c es el área transversal efectiva del núcleo.
- f es la frecuencia
- B_m es la densidad de campo máxima
- J es la densidad de corriente

Por otra parte, en el documento se resalta la importancia que tuvieron los MOSFETs y los núcleos de ferrita en desarrollo temprano de los TPs realizado por Alexander Estrov en 1984, cuyo documento es catalogado como pionero en la tecnología de los TPs. Por su parte, los núcleos de ferrita tienen una facilidad de ser moldeados en casi cualquier forma mientras que los MOSFETs incrementaron la frecuencia de conmutación y le permitieron al diseñador reducir el número de vueltas. [16]

2.3 Desventajas del Transformador Planar

A pesar de las ventajas de tamaño, densidad de potencia y eficiencia que podría representar el TP correctamente diseñado sobre el transformador clásico, existen algunas desventajas que podrían limitar su aplicación. En una comparación hecha por la compañía Pulse Electronics, se muestran las ventajas que tendrían los TPs sobre su contraparte, haciendo énfasis en cómo en el diseño de fuentes de poder son los transformadores e inductores quienes más contribuyen al tamaño, y la relación inversa de este parámetro con la frecuencia. Los TPs le permitirán al diseñador tomar decisiones sobre reducir el tamaño para una cantidad de pérdidas dada o reducir las pérdidas para un tamaño dado. El hecho de ser más antiguos hace de los transformadores clásicos una tecnología madura y conocida, tienen un amplio rango de selección de tamaños de bobinas y núcleos y el tiempo de muestreo de estos es corto, además de que las modificaciones que deban realizárseles son baratas, sencillas y rápidas en comparación con el TP. La conclusión del equipo de Pulse en su documento (que data del 2012) fue: “Mientras la tecnología planar gana aceptación entre los diseñadores, y los volúmenes de producción aumentan, su precio va descendiendo. Sin embargo, si el diseñador tiene el espacio suficiente en el sistema, la mejor apuesta es conservar la tecnología convencional” [17]

Una comparación similar es realizada por V. Gurusamy en sus tesis de maestría, en la que menciona como limitaciones principales del transformador planar:

- Mayor Área de “footprint”: Dado que el área superficial del núcleo es mayor, el área footprint (área de los elementos conductores expuesta al ambiente) es mayor que aquella del transformador convencional. Al aplanar el núcleo, el área trasversal aumenta y el flujo se ve afectado.
- Menor área de ventana: Dado que es más pequeña, hay menos espacio para los bobinados de cobre.
- Bajo factor de relleno de la ventana: De acuerdo con el autor, la mayoría de los componentes bobinados basados en PCB cuentan con un factor de relleno de cobre pequeño (alrededor de 0,25) en comparación con los tradicionales, que tienen cerca de 0,4. Esto se debe a que el bobinado en PCB tiene un espacio entre vueltas mayor, además del grosor del dieléctrico. [14].

Más recientemente, en el 2018, se hizo un estudio sobre el uso de TPs (dentro de convertidores DC – DC) en la *aviación más eléctrica*. Allí se listan las razones por las que sería interesante el uso de estos, no obstante, también se mencionan algunos inconvenientes de esta tecnología, entre las que se encuentran:

- Uso restringido a altas frecuencias.
- Tamaño y forma de núcleo limitados.
- Rango de potencia limitado (algunos kW).
- Inductancia de fuga muy débil para algunas aplicaciones de convertidores resonantes.
- Resistencias DC altas debidas a una longitud media de bobina más grande.
- Complejidad en el cableado en caso de devanados multicapa. [18]

2.4 Devanado del Transformador Planar

El hecho de tener sus bobinados impresos, hace del TP un dispositivo muy atractivo. Por lo general, este bobinado tiene forma de espiral, pero han existido desarrollos con bobinados similares, pero diferentes que presentan ventajas y desventajas los unos de los otros. A continuación, se muestran algunos de los más utilizados y otros con implicaciones que se consideraron pertinentes para el desarrollo de este documento:

Tipo PCB

Son el tipo de devanado más común usado en TPs, de acuerdo a la investigación que hemos realizado. Con el tipo “Lead frame” son también mencionados por el profesor Yaakov en su investigación, donde enfatiza que estos son más apropiados para aplicaciones de alta tensión – baja corriente, por sus conductores planos y delgados que forman varias vueltas alrededor del núcleo. Estos se pueden usar como una sola capa, o también se pueden apilar en varias capas debidamente aisladas. [12]

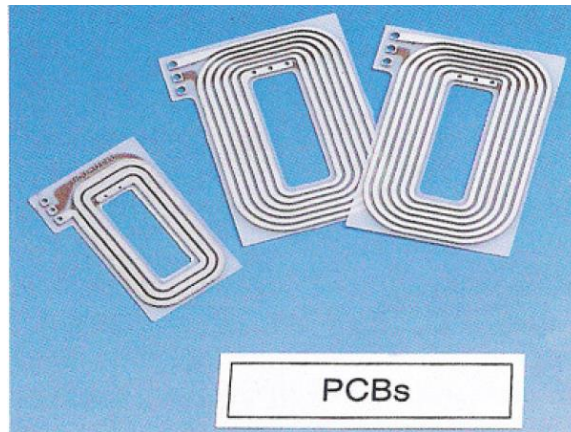


Ilustración 9 – PCBs usados en la investigación del profesor Yaakov. Tomado de [12]

En el capítulo 20 del manual de diseño de transformadores e inductores, hay una sección dedicada al diseño de los bobinados impresos en PCB donde se mencionan dos tipos de uso bastante usual en la industria. La primera, para transformadores con núcleo en forma de E (Ilustración 10).

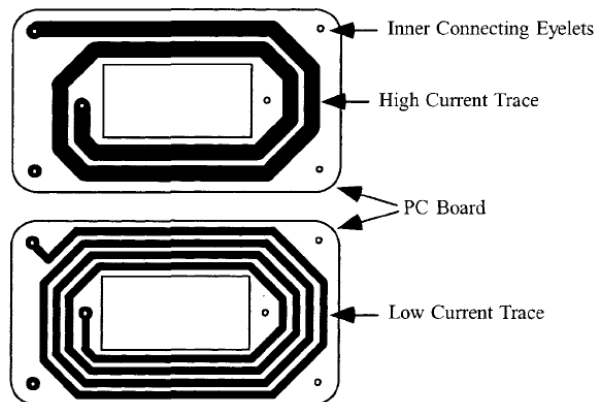


Ilustración 10 Bobinado típico para transformadores con núcleo tipo E. Tomado de [16]

Por otro lado, la segunda (Ilustración 11) está diseñada para transformadores cuyo núcleo tiene la pata central redonda (núcleos tipo PQ, RM, ETD y ER. Que serán explicados más adelante).

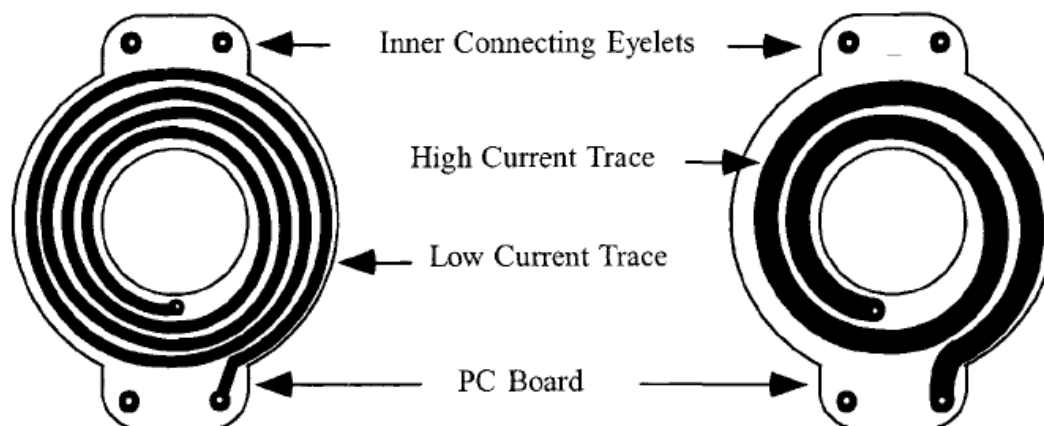


Ilustración 11 – Bobinado redondo para núcleos con pata central redonda. Tomada de [16]

Éstos tienen una ventaja respecto a los núcleos cuyas patas centrales no son redondas, sus diámetros internos (ID) y externo (OD) son redondos, lo cual se traduce en un uso más eficiente del cobre. [16]

Más adelante, en una investigación realizada en el 2014 por el equipo del *College of Technology in Tabuk*, se retoman las PCB como elemento fundamental en la transformación de potencia a altas frecuencias. En el documento *High Frequency Investigation of Planar Transformers*, los autores exponen las diversas ventajas que representa el uso de PCB respecto a los componentes magnéticos tradicionales, haciendo especial énfasis en el uso de éstos para convertidores de potencia donde son considerados grandes y pesados, además de tener difícil implementación en el proceso de conversión de potencia. Las ventajas que mencionan para el uso de PCBs multicapa en TPs son bastante similares a las ya expuestas por Payton Magnetics: bajo perfil, operación a altas frecuencias, tamaño reducido, bajo costo en relación con el rendimiento térmico, y en comparación con su contraparte enrollada, simplicidad de manufactura e integración además de una más alta densidad de potencia. [19]

Tres años después, en el 2017, se llevaron a cabo una serie de experimentos con dos tipos de configuraciones multicapa de PCBs por parte del equipo de la *Politehnica University of Bucharest*, en Rumania. El objetivo de este estudio fue determinar la influencia de la configuración de los PCBs en las inductancias de fuga basados en la fuerza magnetomotriz, enfocándose en el uso de los TP dentro de convertidores DC-DC, donde se plantean frecuentemente las cuestiones de pérdidas tanto en el núcleo como en el devanado.

En el primer tipo de configuración multicapa (Ilustración 12) el primario está compuesto de una única vuelta, y se distribuye en 4 capas mientras que el secundario está compuesto de 2 capas y 4 vueltas. Se puede ver que en el devanado primario la capacidad de conducción de corriente en las 4 capas es mayor:

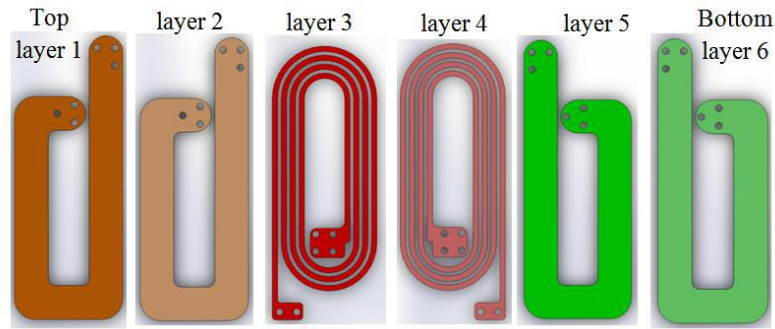


Ilustración 12 – TP1. 2 capas, 4 vueltas en el secundario. Tomada de [20]

El segundo tipo de configuración (Ilustración 13) es opuesto al anterior, ya que hay 4 capas y dos vueltas en el secundario.

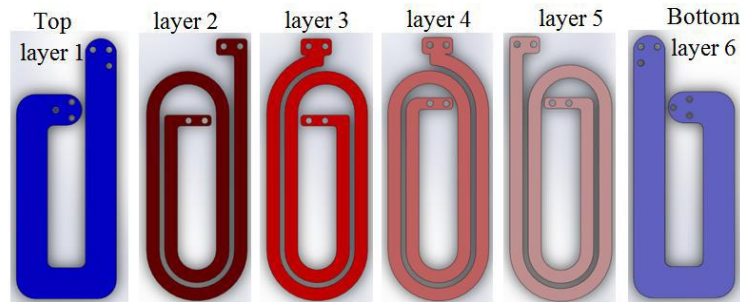


Ilustración 13 - TP2. 4 capas, 2 vueltas en el secundario. Tomada de [20]

Para los dos tipos de TP que se recrearon usando estos devanados, se utilizó un mismo núcleo hecho del material 3F4. En las simulaciones realizadas, los modelos fueron estudiados haciendo uso del Análisis por Elementos Finitos debido a la precisión que puede manejar, éste se utilizó para estudiar como la distribución de la energía afecta la distribución de la fuerza magnetomotriz en los dos TPs. Altos niveles de energía almacenada en los devanados conllevan a inductancias de fuga más grandes y por ende a menores eficiencias en aplicaciones con altas frecuencias de conmutación.

En el estudio se demostró que el segundo tipo de configuración es ligeramente más eficiente que el primero. [20]

Tipo “Marco de plomo”

Continuando con el documento del profesor Yaakov, en este se mencionan dos tipos de bobinado para los transformadores y bobinas planares: Por un lado, está el tipo PCB, como se mencionó anteriormente y secundariamente, los tipo “Marco de plomo” (por su nombre en inglés: “Lead frame”), que se muestran en la Ilustración 14.

Este tipo de bobinados concierne solo una vuelta, que se diseña para encajar en el núcleo directamente. Dado que se trata de una sola vuelta, son más anchos y por ende, capaces de soportar más corriente lo cual los convierte en dispositivos muy efectivos para trabajar en aplicaciones de baja tensión-alta corriente tanto en una como en múltiples capas. [12]

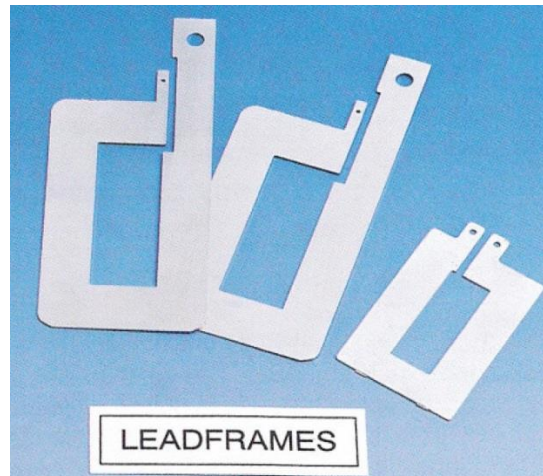


Ilustración 14 – Bobinados tipo “Marco de Plomo” usados en la investigación del profesor Yaakov. Tomada de [12]

Tipo Meandro

Este tipo de bobinado fue desarrollado en 2012 en la Universidad de Novi Sad, Serbia en un estudio liderado por Snezana Djuric; en él se presenta un nuevo diseño de transformador planar basado en el modelado de su bobinado (tipo “meandro”) impreso en PCB, que es engravado en la superficie de un núcleo plano, tal como se muestra en la Ilustración 15. Las llamadas “Vias” son las que se encargan de conectar las pistas de los primarios y secundarios arriba y abajo. Este diseño reduce el grosor del transformador en comparación con los que usan núcleos de tipo E y los TP donde se acuñan PCBs con bobinados impresos.

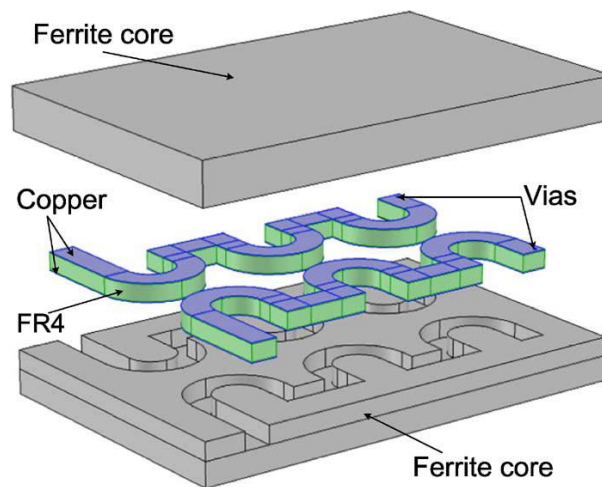


Ilustración 15 – Modelado 3D del TP tipo meandro. Tomada de [21]

Para el estudio, se realizó un prototipo real y se hizo una simulación (por el método de elementos finitos) en la que se analizó la distribución de los flujos magnéticos del transformador completo, y otra sin el núcleo. Esto se hizo dado que el entrehierro de aire que se crea al utilizar ferrita reduce la inductancia de los bobinados primario y secundario, además de su acoplamiento. Para el primer caso, se obtuvo una inductancia de 70nH en promedio (para frecuencias de 0.1 a 1 MHz), lo cual es aprox. 22% mayor al segundo (alrededor de 50nH). Y, a modo de conclusión, se

obtuvo un coeficiente de acoplamiento de alrededor de 0.5 (igualmente para frecuencias de 0.1 a 1MHz). [21]

Este prototipo fue mejorado en 2014 por un equipo igualmente conducido por S. Djuric. La idea inicial del diseño original fue reducir el grosor general del transformador, pero se presentaron algunos inconvenientes, los bobinados primario y secundario no compartían un camino de flujo dado que el coeficiente de acoplamiento no era lo suficientemente alto (aprox. 0.5), además, la inductancia se veía reducida debido a que la corriente en las dos capas de los devanados iba en dirección opuesta, lo que generaba un choque entre los vectores de campo. Con el fin de solucionar estos problemas, el equipo experimentó con 3 prototipos diferentes, cuyos procedimientos detallados se encuentran en el paper. En la Ilustración 16 se muestra el diseño propuesto.

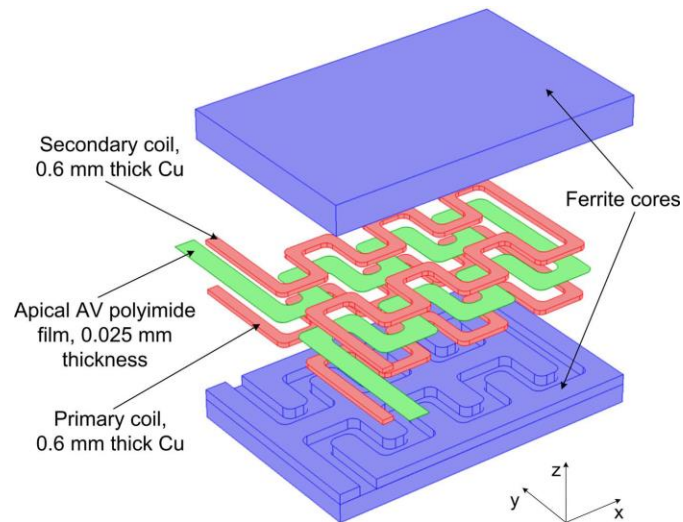


Ilustración 16. Diseño mejorado de TP con bobinados en meandro. Tomado de [22]

Con el fin de comparar resultados, el equipo hizo el diseño con materiales similares al realizado en el 2012. El núcleo está compuesto por el mismo material de ferrita (Ferroxcube E43/10/28 3F3) cuya permeabilidad relativa es considerable ($2000 \pm 20\%$), aunque como se ve en la Ilustración 16, el diseño de las bobinas es diferente. En el 2013 el mismo equipo llevó a cabo una investigación sobre el efecto de acoplamiento en diferentes tipos de bobinados en meandro, y se basaron en ella para realizar el prototipo de transformador aquí presentado. Los devanados primario y secundario están separados en el eje z, pero mantienen la misma posición en xy, es por ello que el flujo atraviesa cada vuelta de meandro de la bobina secundaria. Los devanados están hechos de cobre grueso de 0.6mm y, para prevenir cortos, se usa una película de poliamida AV de tipo apical de 0.025 mm de grosor puesto que esta tiene un amplio rango de temperaturas y altas tensiones.

Este nuevo diseño mostró resultados significativamente mejores que su predecesor: con el núcleo de ferrita se obtuvieron, para un rango de frecuencias entre 0.1 y 10 MHz (la ferrita trabaja en un rango de 0.2 - .05 MHz), una inductancia de aproximadamente 1640 nH constantes y un coeficiente de acoplamiento de alrededor de 0.93 igualmente constante. [22]

2.5 Núcleo del Transformador Planar

Así como para los bobinados, existen diversas configuraciones de núcleo que tienen características enfocadas a usos determinados.

En el 2004, durante la *conferencia de especialistas en electrónica de potencia de la IEEE* se presentó una investigación sobre la *Integración electromagnética de circuitos resonantes de alta potencia*. En ella, se toman los *transformadores electromagnéticamente integrados* y se clasifican de acuerdo con la forma de su núcleo (cómo éste está comprimido) y a la orientación de sus flujos de dispersión (perpendicular o alineados) respecto a la dirección de los devanados, además de proponer nuevas combinaciones de estos.

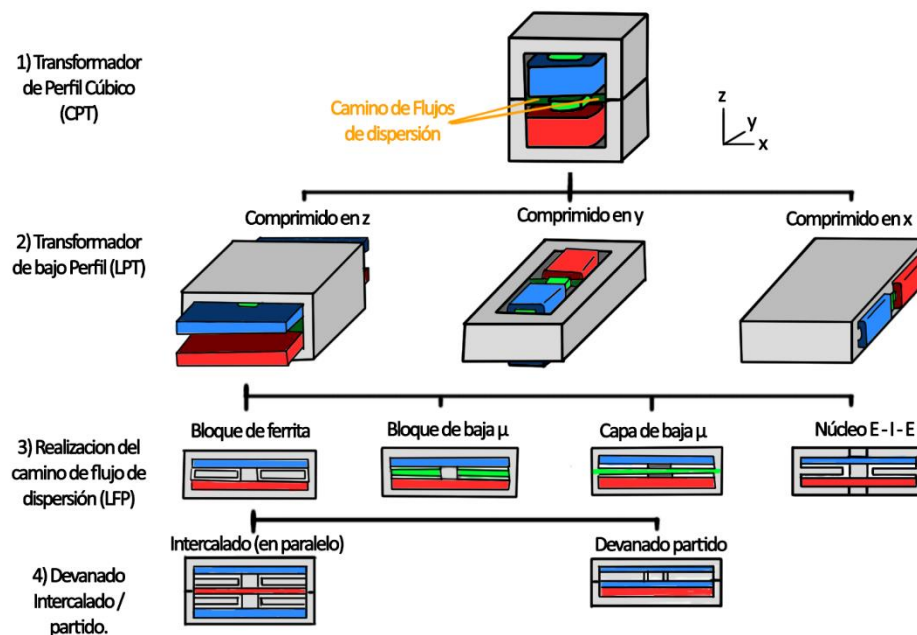


Ilustración 17. Transformador planar a partir del Transformador de Perfil Cúbico. Tomado de [23] y rediseñado.

En la Ilustración 17 se explica cómo se obtiene el transformador planar desde el Transformador de Perfil Cúbico con flujos de dispersión perpendiculares a los devanados: Al comprimirlo en z (segunda línea) existen 4 posibilidades de flujos de dispersión (tercera línea), tomando la primera (bloque de ferrita) se pueden entrelazar los bobinados (cuarta línea) para reducir las pérdidas de proximidad (izquierda) o partiendo uno de los bobinados para ajustar la inductancia de fuga y reducir la longitud de la brecha de aire (derecha).

Para la compresión-z (transformador planar), los autores concluyen que tiene una conducción de corriente por capa más alta, además de presentar uniformidad en la distribución de corriente dentro del área trasversal, y también muestra el volumen más bajo en comparación con los otros diseños, no obstante, presenta una gran longitud de sus devanados en comparación con el transformador de perfil cúbico, lo cual significa pérdidas DC más altas. [23]

A pesar de ser las geometrías más habituales, las tipo EE y EI no son las únicas disponibles en la actualidad. De hecho, existe un número considerable de variaciones cuyas características diferirán dependiendo del propósito del transformador. En esta sección se recopilan algunas de las más usadas en los últimos 15 años.

En el manual de diseño de TP de la editorial Marcel Dekker, se mencionan algunas variaciones de núcleos. Se explica allí como estas variaciones le ofrecen una gama más amplia de opciones al diseñador de transformadores, que puede escoger no solo de las enumeradas, sino también mandar a recrear una con características personalizadas a compañías que ofrecen esta opción.

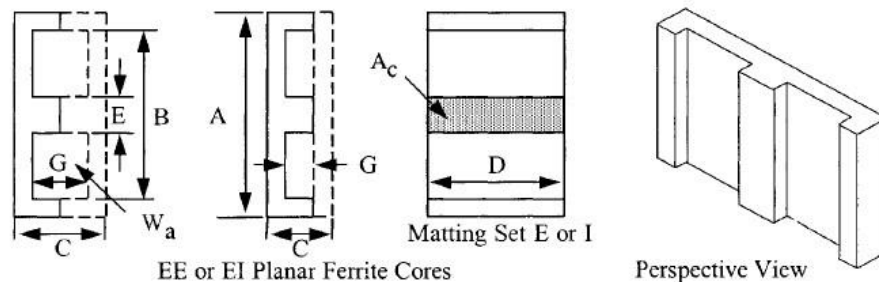


Ilustración 18 Núcleo tipo EE o EI de Magnetic Inc. Tomada de [16]

En la Ilustración 18 se muestran el núcleo de tipo EE (en el extremo izquierdo) y el núcleo de tipo EI (segundo de izquierda a derecha). Estos tipos de núcleo son los más conocidos y utilizados para los TP en general, debido a la relativa simplicidad de su diseño respecto a sus pares. En el documento se mencionan compañías que para la época (2004) se encargaban de diseñar estos núcleos para propósitos industriales: Ferroxcube, Magnetic Inc, Ferrite International y Ceramic Magnetics Inc (CMI), ésta última en particular es la que podía fabricar diseños con especificaciones especiales dados por el comprador. Para esta consulta bibliográfica (2019) se verificó que los sitios de dichas compañías siguiesen vigentes.

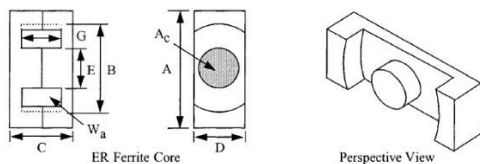


Ilustración 19. Núcleo de tipo ER, de Ferroxcube. Tomada de [16]

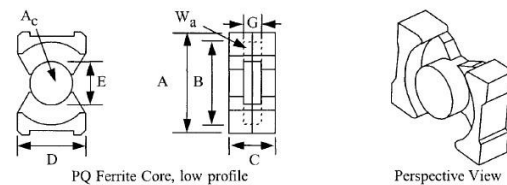


Ilustración 21. Núcleo de tipo PQ (Power Quality), de Ferrite International. Tomada de [16]

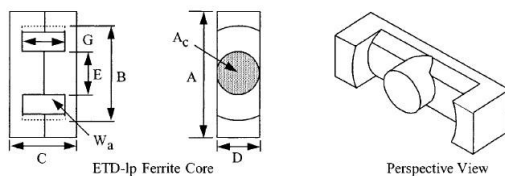


Ilustración 20. Núcleo de tipo ETD (Economic Transformer Design), de Ferrite International. Tomada de [16]

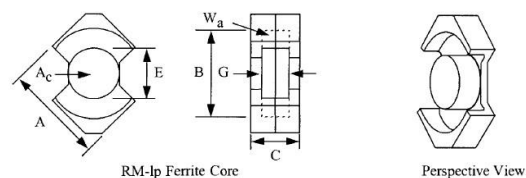


Ilustración 22. Núcleo de tipo RM, de Ferroxcube. Tomada de [16]

Los núcleos de las ilustraciones anteriores tienen su pata central redonda, lo cual, como se mencionó anteriormente en la sección de devanados, representa una ventaja ya que el uso del cobre y espacio en la tarjeta por parte de estos es más eficiente que para el caso de los tipos EE o EI. [16]

Ésta misma ventaja es mencionada en el artículo sobre el uso de TPs en *aviación más eléctrica*, donde se menciona que además de un uso más eficiente del espacio (y consecuentemente una menor longitud de devanado), las pérdidas por cobre y los elementos parásitos se presentan a un nivel menor. En éste artículo se habla a modo de introducción de las topologías de núcleos *ya existentes*, y a pesar de tener 14 años de diferencia con el manual de diseño de TPs, se mencionan las mostradas en las ilustraciones Ilustración 18 , Ilustración 19, y Ilustración 21, entre otras.

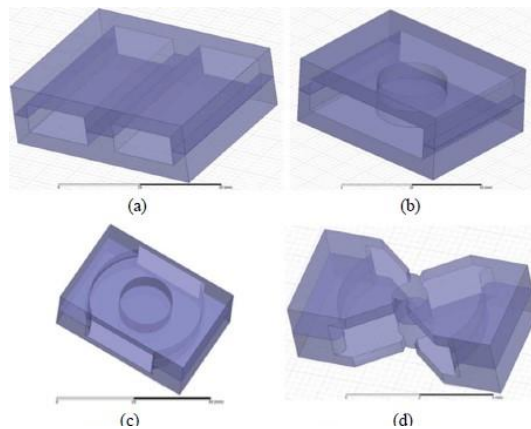


Ilustración 23 Tipos de núcleos disponibles: a) EE b) ER c) EQ y d) PQ. Tomada de [18]

Es menester aclarar que lo que se menciona como EQ en este artículo, equivale a ER en el manual de diseño de TPs del 2004.

Tomando datos de rangos mínimos y máximos de tamaños y pesos para cada topología de un catálogo de Ferroxcube de ese año, se llega a las siguientes conclusiones sobre los tipos de núcleo mencionados en la Ilustración 23:

- La topología EE aparenta tener la mejor relación tamaño/peso y Área Producto para núcleos planares más grandes.
- La topología PQ es un poco más ligera, pero es descompensada por su volumen. Esto debido a que su núcleo no tiene un bajo perfil.
- EQ tiene limitaciones por el tamaño del núcleo.
- La ER es la que cubre el rango más alto en términos de peso y volumen.

Adicionalmente, se realiza aquí una comparación del núcleo tipo EE más pequeño y del más grande disponibles en Ferroxcube con su equivalente de núcleo convencional, considerando un Área producto aproximadamente igual. Con esa comparación se concluye que además de tener núcleos más ligeros y menos voluminosos, tienen un ratio de superficie/volumen más alto, lo que los convierte en mejores candidatos para el incremento de la densidad de potencia y el enfriamiento. Se resalta igualmente la importancia del material magnético del que están hechos estos núcleos, pues éste está relacionado con el rendimiento magnético además de sus características térmicas: para una frecuencia de conmutación dada, se selecciona el material magnético más adecuado que permita obtener el máximo valor de inductancia de magnetización. Para este valor, las fábricas pueden dar

una tolerancia de entre 20 y 25%, adicionalmente se puede agregar un entrehierro para controlar la magnetización y evitar saturación del núcleo, sin embargo, esto puede conllevar a generar más pérdidas debidas a los flujos que se escapan en el entrehierro. Para reducir este efecto, se deben colocar los conductores alejados del núcleo de aire. [18]

Núcleo de tipo Maceta

En el mismo año, 2018, el equipo de la universidad COMSATS en cooperación con el de la universidad de Lahore, en Pakistán, realizaron un análisis y modelamiento numérico del transformador con núcleo de tipo Maceta (Ilustración 24), mediante el uso del software COMSOL Multiphysics, con el fin de caracterizarlo y proponer un método que permitiese implementarlo debido al nivel de complejidad de su geometría y configuración. En este estudio, se obtienen resultados que evalúan su rendimiento para altas frecuencias (1 – 5 MHz), bajo una excitación constante y un nivel de potencia de 50W. A modo de conclusión, se obtienen niveles de eficiencia de más del 90% para frecuencias mayores a 3 MHz para distintas cargas (10, 15, 20 y 25 ohm). De acuerdo a los autores, estos resultados son consistentes con aquellos de la literatura ya existente. [24]

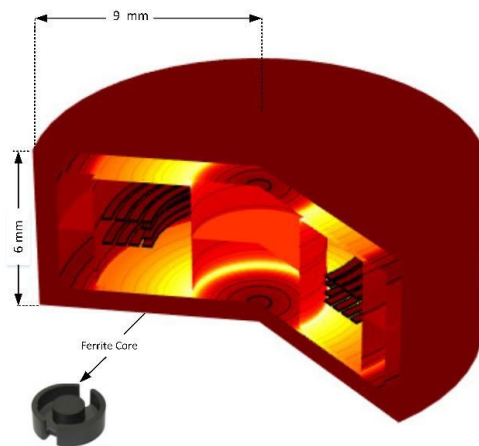


Ilustración 24. Núcleo de tipo Maceta, tomado de [24]

Pérdidas en el núcleo

Al igual que en el transformador convencional, los transformadores planares presentan pérdidas por corrientes parásitas (o corrientes de Foucault) y pérdidas por histéresis, principalmente. Para el primer caso, a mayor conductividad eléctrica tenga el elemento, mayores serán las pérdidas, es por esa razón que la ferrita es uno de los materiales más comúnmente usados para el diseño de transformadores, ésta tiene una baja conductividad eléctrica que la convierte en un material bastante adecuado para su función.

En su comparación de transformadores planares y convencionales, el profesor Yaakov también se refiere a las pérdidas eléctricas en el núcleo. En el mismo artículo, él menciona que las pérdidas por corrientes parásitas, o corrientes de Eddy, son despreciables puesto que los núcleos modernos, normalmente están hechos de ferrita o polvo de hierro, materiales cuya resistividad es

bastante alta. Por su parte, las pérdidas por histéresis se definen como una función no lineal del flujo magnético máximo y de la frecuencia de conmutación, como se muestra en la Ecuación 16

$$P_{hys} = K_c DB^m f_s^n$$

Ecuación 16, tomada de [12]

Donde:

- P_{hys} representa las pérdidas por histéresis por unidad de volumen
- DB es la oscilación de densidad de flujo magnético
- f_s es la frecuencia de conmutación
- K_c es la constante de pérdidas del núcleo
- m es una constante en el rango de 2 a 3
- n es una constante en el rango de 1 a 2

La interpretación que se da en el documento a esta ecuación explica que a medida que se incrementa la frecuencia, el flujo magnético máximo debe ser reducido para mantener el mismo nivel de pérdidas. Sin embargo, para lograr una reducción de este flujo, se hace necesaria un área transversal incrementada, si se va a mantener el mismo número de vueltas. Por otro lado, un aumento del área transversal implica un volumen más grande de núcleo, lo que incrementaría las pérdidas totales en este. Es por ello por lo que, en conclusión, se preferiría un núcleo con una sección transversal grande y un volumen relativamente pequeño. [12]

Por otro lado, en el estudio de pérdidas en transformadores planares con diferentes estructuras de capas, realizado en el 2017, se menciona la *capacitancia parásita*, un efecto indeseado de capacitancia distribuida que se genera entre dos conductores con potencial diferente, lo cual ocurre en la distribución de PCB con la que se realiza el TP. Estas son generadas entre los devanados en sí mismos, entre las espirales y entre los devanados y el núcleo. Entre los efectos indeseados de éstos se encuentran resonancias paralelas y flujos de dispersión en los componentes magnéticos. Esta energía indeseable que se almacena en el TP puede ser minimizada reduciendo el número de vueltas, y el intercalado de los bobinados, tal como se concluyó en la sección de los devanados. [20]

3 Desarrollo del prototipo

Para comenzar, se obtuvieron los siguientes materiales con los que se daría vida al primer prototipo de transformador planar:

3.1 Núcleos de ferrita de tipo EQ

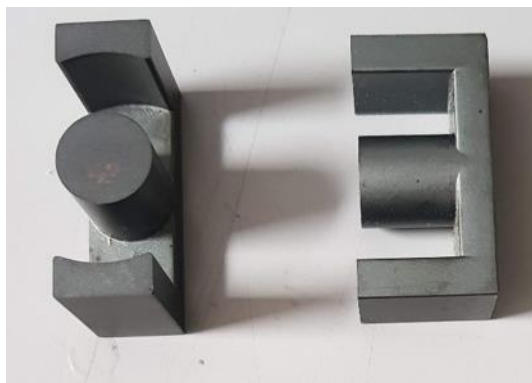


Ilustración 25 – Prototipo de Núcleo EQ.

Se obtuvieron para el desarrollo varias muestras de núcleos tipo EQ (Ilustración 25), cuya pata central redonda permite un mejor uso del cobre, como se especificó anteriormente.

Estos núcleos tenían las siguientes dimensiones:

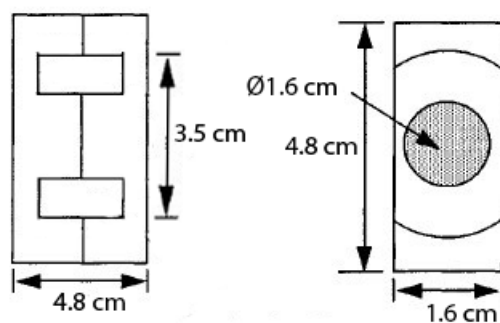


Ilustración 26 – Dimensiones del núcleo

En estos modelos, existía un problema: Al juntar ambas mitades con el fin de hacer el núcleo que sostendría los devanados se generaba un entrehierro en la pata central que, aunque tiene aplicaciones útiles (para almacenar energía en el campo magnético que se genera allí debido a la gran diferencia de permeabilidad de los medios, ejemplos de uso son el transformador Flyback o los inductores PFC), en nuestro caso no lo era ya que no permitiría una concatenación apropiada de los flujos. Tal como se muestra en la siguiente imagen:

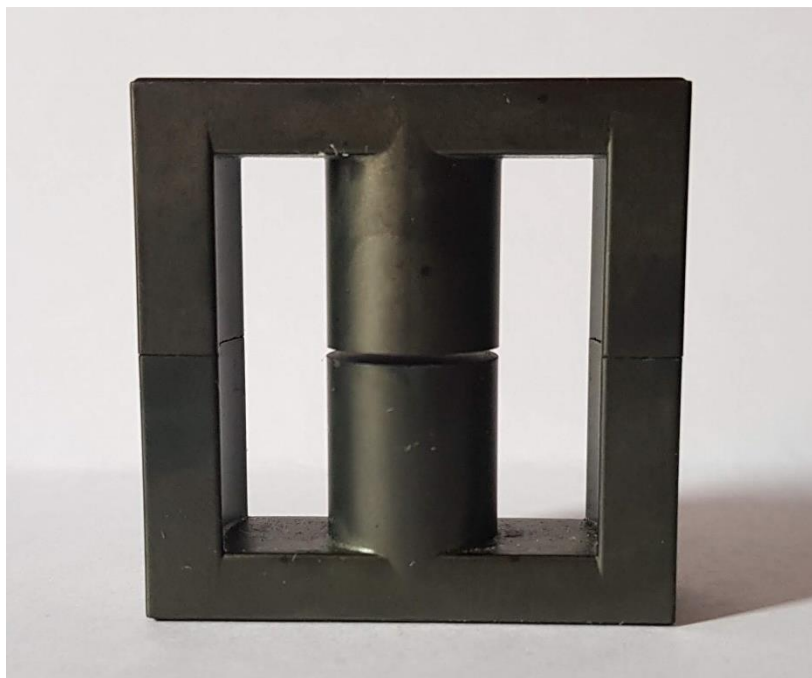


Ilustración 27 – Entrehierro existente entre los núcleos obtenidos

No obstante, se pensaron maneras de eliminar el entrehierro. La primera de ellas fue limar las patas exteriores y reducirlas al tamaño de la central, haciendo uso de lijas típicas y luego con una máquina lijadora. En este proceso, se perdieron varios ejemplares y aquellos con los que logramos avanzar, quedaron con superficies desiguales lo que a la larga generaría problemas en el proceso de conversión de energía. Esta situación nos llevó a pensar en alternativas, posibles soluciones al problema.

Una de ellas fue comprar los núcleos por internet tanto nacional, como internacionalmente, pero no había en todos los casos la forma que precisábamos y el tamaño de estos era considerablemente inferior al de los iniciales, los cuales eran problemas dado que ya se había invertido bastante tiempo en el diseño de los devanados adaptados al tamaño de ellos. Pese a ello, se conservaron estos ejemplares para experimentos futuros.

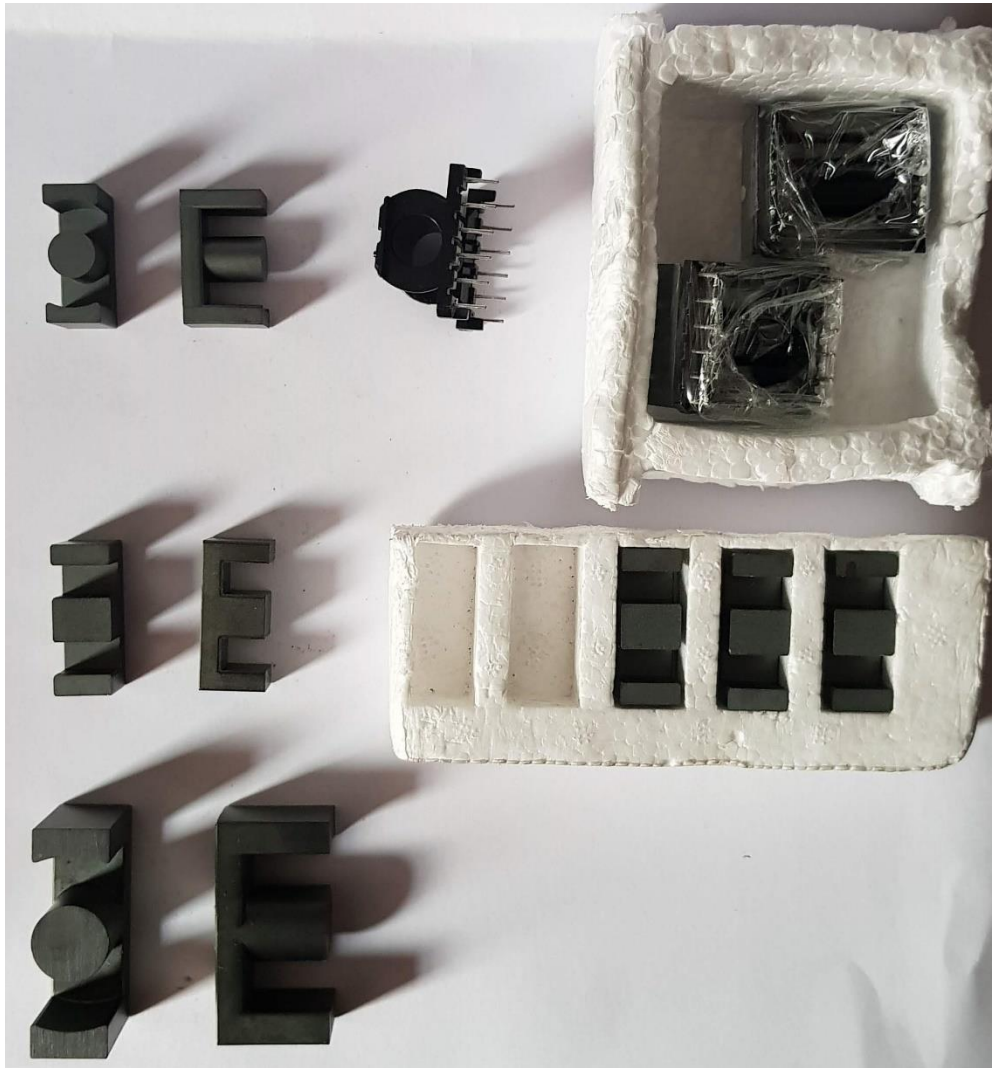


Ilustración 28 - Prototipos comprados en internet (dos filas superiores) en comparación con el utilizado en el proyecto (tercera fila)

Luego de eso, se encontró otra posibilidad en el uso de una máquina de control numérico (CNC) disponible en las instalaciones de los laboratorios de ingeniería mecánica, al interior de la universidad. Con esta máquina se modelan distintos metales a precisión mediante el uso de “fresas” que cortan con precisión milimétrica mediante la fricción a distintas velocidades, por lo que se consideró que podría ser una buena opción para eliminar el entrehierro, sin embargo, al final esta opción tuvo que descartarse puesto que la ferrita tiene una estructura bastante frágil que, al ser sometida al proceso de corte con distintas fresas y velocidades, se quebró con facilidad. En la Ilustración 29 se muestran la máquina usada, los núcleos dentro de ella y el resultado final.



Ilustración 29 – Izquierda: Máquina CNC / Centro: Núcleos dentro de la CNC / Derecha: Resultado post-procesamiento

Debido a que esto no funcionó, se decidió intentar lijar las patas exteriores nuevamente usando otro tipo de superficie de soporte, una lija de mayor calibre y realizando movimientos unidireccionales. Esta decisión se tomó basados en la experiencia del ingeniero a cargo de la máquina CNC, quien nos guió para realizar el proceso de manera correcta.

3.2 Devanados

Inicialmente, se compraron varias placas PCB de una capa acompañadas de Percloruro de Hierro (ácido que se usa para derretir el cobre no deseado) con el que se realizarían manualmente los caminos de cobre con un marcador. Debido al tamaño del núcleo, al que se debían adaptar las PCB, estas se recortaron en cuatro piezas de manera que los devanados encajaran en él. Se dibujaron manualmente entonces los caminos y se sumergieron las placas en el ácido en plazos diferentes, puesto que los resultados no eran consistentes: algunas habían derretido el material sin dibujo en 2 o 3 horas, otras tomaron hasta un día. En la Ilustración 30 se muestran los resultados obtenidos:



Ilustración 30 - A la izquierda, se muestra cómo se realizaron los caminos con marcador y a la derecha, como quedaron algunos de los ejemplares posterior a la exposición al ácido.

Es evidente que el cobre resultante en las placas tendría una conducción pobre de corriente por lo que se hizo necesario buscar una alternativa.

Esta alternativa se encontró en realizar el diseño de los devanados mediante el uso de software para posteriormente mandarlo a imprimir a una empresa especializada. El diseño se realizó inicialmente haciendo uso de Adobe Illustrator, para ello se tomaron las medidas mostradas en la Ilustración 26. En la Ilustración 31 se muestra el diseño realizado.

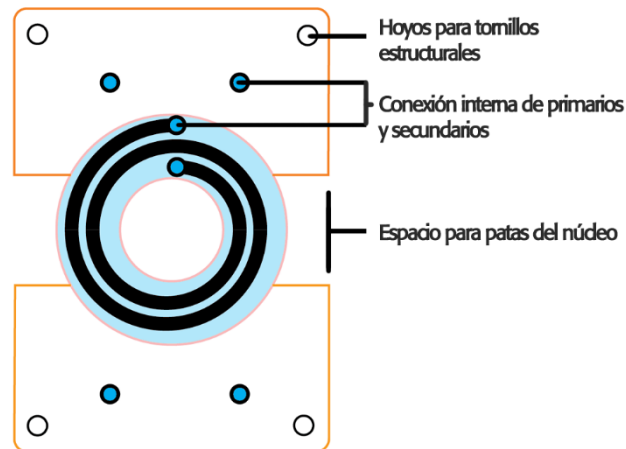


Ilustración 31 – Diseño del devanado realizado en Illustrator.

Los bordes naranjas son el recorte que se le haría a la PCB para que estas encajen en el núcleo dejando un pequeño margen de 1.2 mm. El radio del círculo interior es de 1.605 mm, que es básicamente igual al de la pata central del núcleo, que tiene 1.6 mm. El área azul es la máxima permitida entre las patas del núcleo, y donde circularían los caminos de cobre. Para la realización de estos últimos, se tomó como base el experimental que se utilizó en [16] para el cálculo de la resistencia y disipación de calor, que es de 2.2 mm. Inicialmente se intentaron hacer tres vueltas de devanado, pero para dicho grosor el espacio era insuficiente, así que se dejaron solo dos.

En los cuatro hoyos blancos de los extremos se ponen los tornillos que sostendrían la estructura. Para estos, se tomó la medida estándar de 3 mm. Sin embargo, esta medida se debió cambiar puesto que no había disponibilidad de tornillos con ese diámetro de tuerca con al menos 5 cm de largo, por lo que decidimos dejarla de 6mm.

Los hoyos azules, de 2mm, representan los que se utilizarían para las conexiones internas del transformador, se realizaron con el objetivo de usar cable de calibre 14 (1.6 mm) o menor y que pudiese ser manipulado con facilidad. Estos serían impresos con cobre alrededor para facilitar la conexión entre los distintos puntos del transformador, más adelante se explicará a fondo como estas fueron realizadas. Los cuatro hoyos de los extremos sirven como entradas y salidas del transformador, pero también se usan para conexiones internas entre el primario y secundario en algunas de las placas, como se explicará también más adelante. En este punto ya se tenía un diseño concreto para ser enviado a fabricación a JLCPCB (empresa china productora de PCBs) [25], sin embargo, aún faltaba exportarlo al formato que solicita la compañía: el formato Gerber (formato estándar para la fabricación de PCBs). Era necesario encontrar un programa que permitiese exportar desde Illustrator a Gerber, para lo cual existían algunas opciones como Kicad. Sin embargo, debido a

su simplicidad e interfaz intuitiva, escogimos Fritzing, un software gratuito de código abierto que permite crear, modificar y manipular diseños de PCBs, además por supuesto, de importar editables desde Illustrator en formato vectorial (.svg).

Luego de aprender a manejar los elementos básicos del programa, se exportaron las imágenes desde Illustrator, que debieron ser organizadas en capas que el programa pudiese detectar, así: copper top (cobre - superior), copper bottom (cobre – inferior), silkscreen top (serigrafía – superior), silkscreen bottom (serigrafía – inferior) y la base de la PCB. En este proceso se realizaron progresivamente algunas modificaciones (como se muestra en la Ilustración 32) al diseño de la PCB para simplificar la manipulación luego de recibirlas impresas.

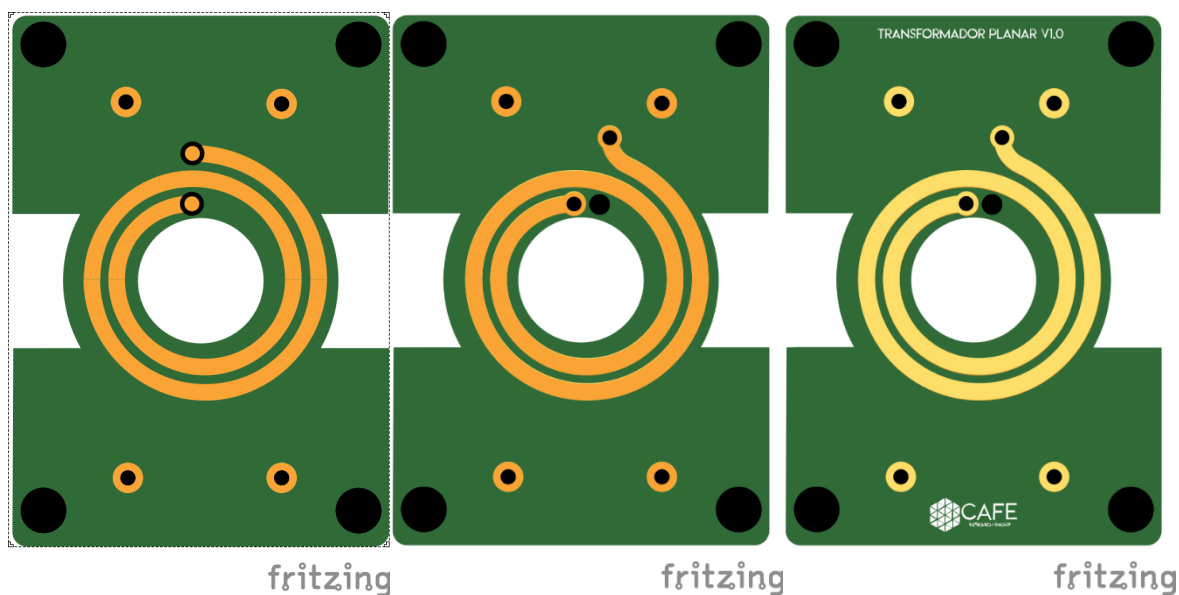


Ilustración 32 – Izquierda: Diseño original exportado, hoyos estructurales aumentados. Centro: Se modifica el devanado para facilitar la conexión, se agrega un hoyo sin cobre para simplificar las conexiones intercaladas (P-S-P-S-P-S). Derecha: Se agrega serigrafía del grupo de investigación y nombre del proyecto.

Una vez completado el diseño de las PCB, se guardó en formato Gerber y se cargó al sitio web de JLCPCB para realizar la orden. Se enviaron a producir 5 hojas panelizadas (esta opción ofrecida por el sitio permite imprimir varios diseños en una hoja con bordes fáciles de quebrar) de 152mm*150mm con 6 devanados cada una, que tomaron aproximadamente un mes para llegar.

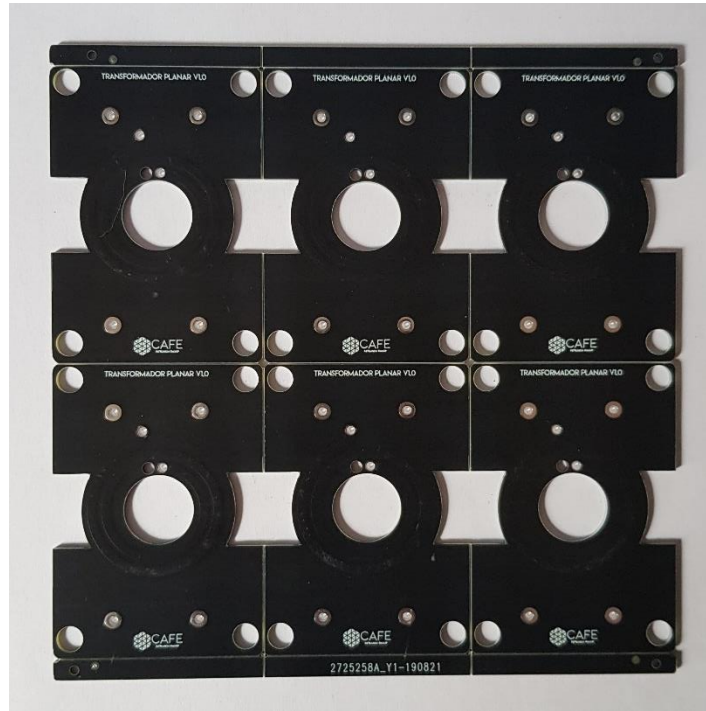


Ilustración 33 - Panel de 6 devanados recibido.

Aproximadamente 15 días después de realizar la orden, se comunicaron desde JLCPCB mediante correo electrónico para hacer verificaciones del diseño antes de su producción, donde requerían datos más específicos de este. En la Ilustración 34 se muestra una comparación entre el devanado recibido y el prototipo inicial impreso en papel que se usó para asegurarse de que los tamaños fuesen coherentes antes de su impresión definitiva.

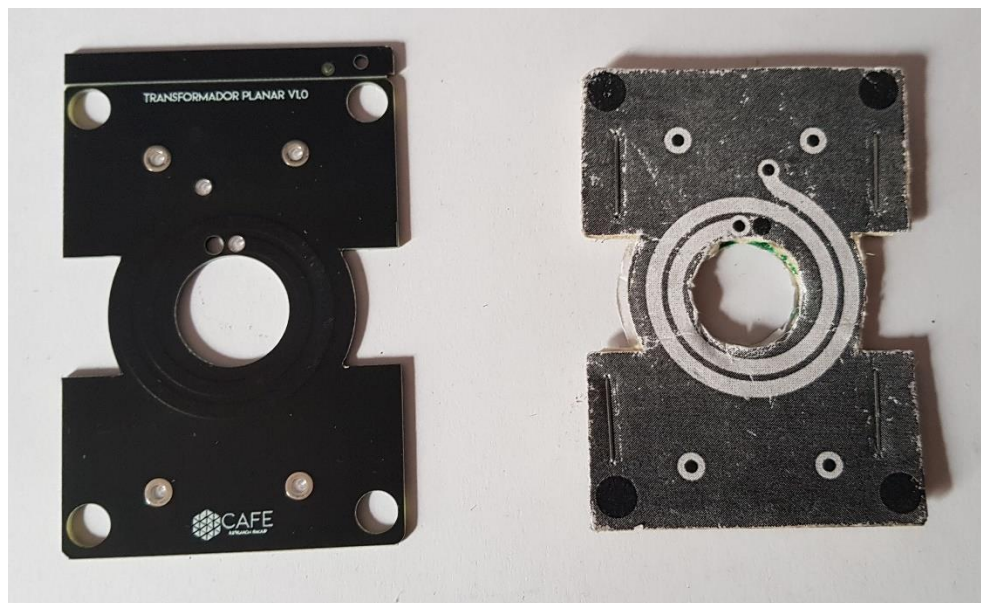


Ilustración 34 - A la derecha, el diseño recibido y a la izquierda, el diseño utilizado para pruebas de tamaño y muestra del prototipo

3.3 Montaje y cableado.

Con las piezas listas para ser ensambladas, se procedió inicialmente a realizar la conexión entre los devanados, como se muestra en el siguiente esquema:

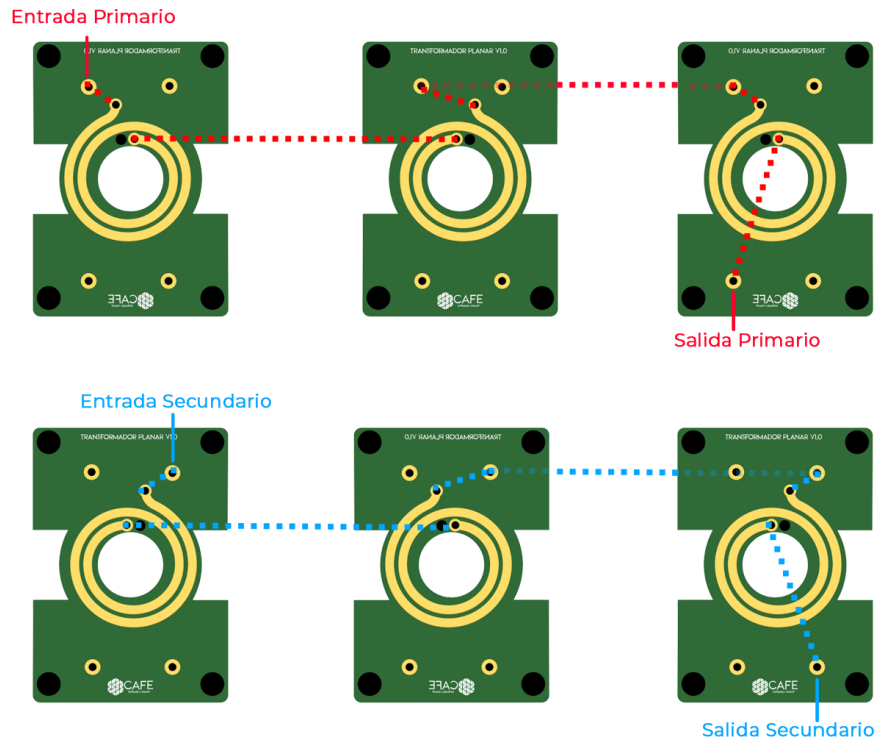


Ilustración 35 – Conexión PPP - SSS

Se decidió realizar un transformador con relación de transformación 1:1 con el propósito de comprobar el funcionamiento y la transferencia de potencia del primario al secundario. Diferentes intercalaciones de las tarjetas PCB de los devanados permiten obtener diferentes resultados, tal como se muestra en [19]. La más sencilla de realizar (que, no obstante presenta una resistencia AC más grande, y por ende mayores pérdidas) es la de tipo PPP – SSS en la cual se colocan los tres devanados primarios apilados y no se intercalan con los devanados secundarios que también están apilados. Los devanados fueron realizados para poder realizar un segundo prototipo futuro con conexión P-S-P-S-P (por ello se diseñó el hoyo sin cobre en el centro del devanado, como se mencionó anteriormente) que de acuerdo con la investigación de [19] presenta menos pérdidas.

Estas conexiones se realizaron con cable calibre 14 para el cual fueron diseñados los hoyos de los devanados, mediante soldadura de punto con estaño. Durante el proceso de soldado, se sostuvo la estructura con los tornillos que se obtuvieron (M6 con 5 cm de largo de tipo estrella), para que se mantuviese su forma y que la posterior inserción del núcleo pudiese ser realizada con fluidez. A medida que se avanzaba en el cableado, se colocaban tuercas M6 para garantizar la solidez de la composición.

Una vez realizadas las conexiones, se procedió a insertar el núcleo y se aseguró este con amarras simples, el cobre se dejó intencionalmente extendido en las entradas y salidas del primario y secundario para conectar los caimanes y/o pines de máquinas de laboratorio.



Ilustración 36 - Prototipo finalizado

3.4 Resultados experimentales: Transformación de tensión.

Una vez el prototipo finalizado, se procede al laboratorio en las instalaciones de la universidad para evaluar la transferencia de potencia y el correcto funcionamiento del transformador. Para tal propósito, se utilizaron un generador de señales y un voltímetro; en uno de los lados del transformador se colocaron los caimanes del generador de señales, y en el otro, las sondas del osciloscopio. Tal como se evidencia en la **Ilustración 37**.

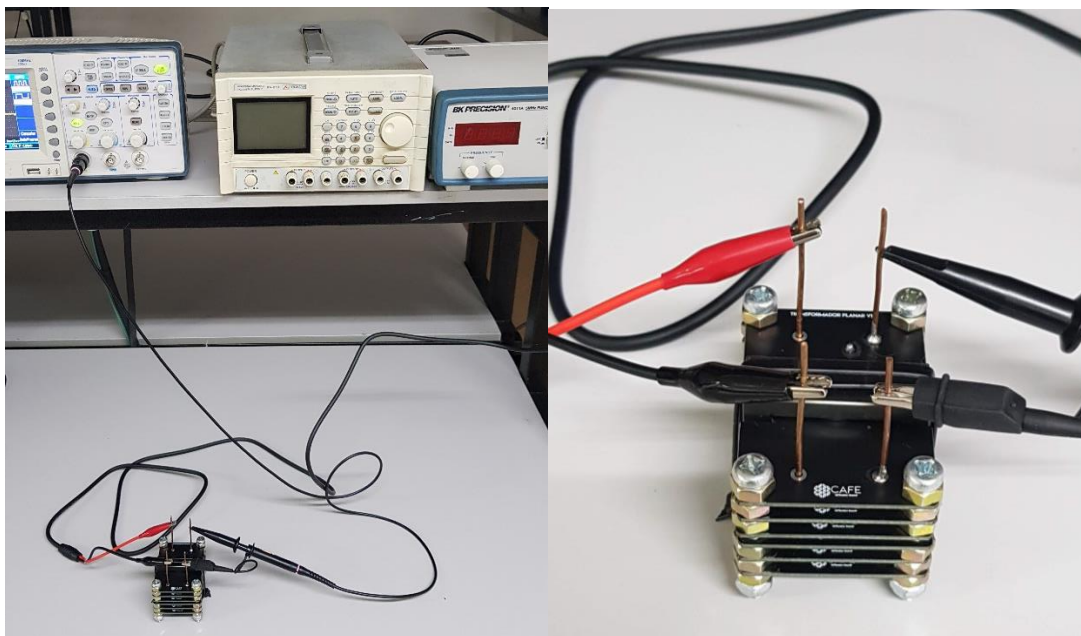


Ilustración 37 - Evaluación de prototipo. A la izquierda: Conexión al osciloscopio y al generador de señales. A la derecha: Aproximamiento

Es importante aclarar que antes de la evaluación del comportamiento, se realizó una prueba de conducción entre el primario y el secundario con el voltímetro para garantizar que no hubiese contactos que causaran que en la salida se mostrase la misma señal que en la entrada, o peor, que ocurriese un corto circuito.

Luego de realizadas las conexiones, se encienden los dispositivos de medición y se inicia excitando en el primario con una señal sinusoidal de baja frecuencia que se aumenta paulatinamente hasta obtener en el osciloscopio algo diferente al ruido. Alrededor de los 800Hz se empieza a distinguir una señal sinusoidal, a partir de este punto se toman capturas de pantalla a distintas frecuencias con el fin de mostrar el comportamiento del transformador diseñado.

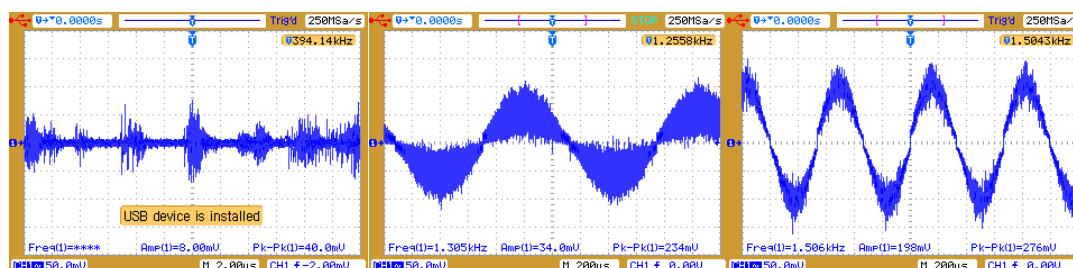


Ilustración 38 - Señal en la salida a 800Hz, 1300Hz y 1500Hz respectivamente

Se puede notar aquí que la señal se vuelve cada vez más distinguible en los 1300Hz, y para los 1500Hz ya se puede notar claramente una senoide. Para estas capturas se utilizó el modo “Multi-periodo”

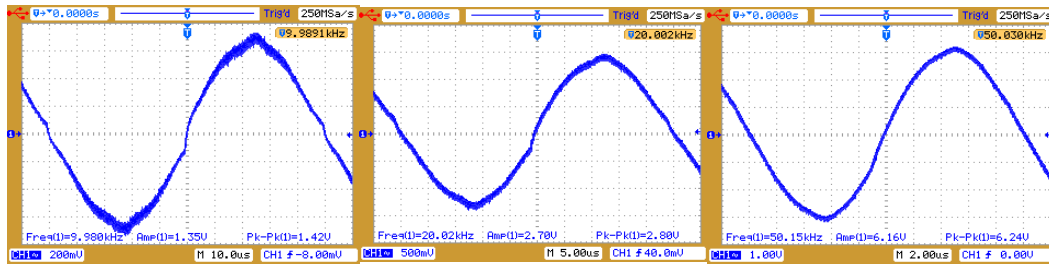


Ilustración 39 - 10KHz, 20KHz y 50KHz respectivamente.

Para niveles cada vez más altos de frecuencia la señal tomaba más claridad. En los 50KHz ya es posible verla sin ruido. Para estas capturas se utilizó el modo “Un periodo”.

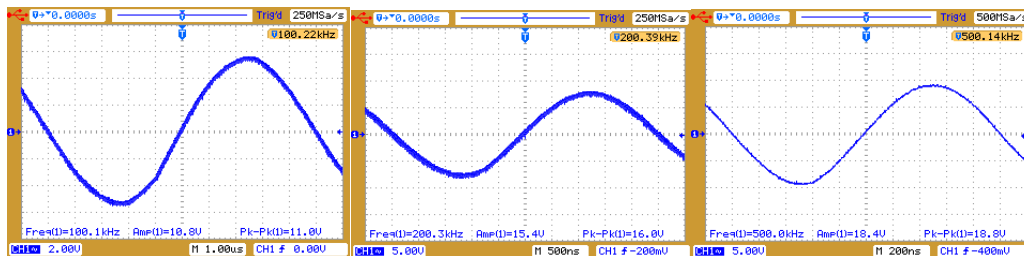


Ilustración 40 - 100KHz, 200KHz y 500KHz respectivamente.

A medida que se aumentaba la frecuencia, aumentaba la amplitud de la senoide. En 800Hz se pueden ver 8mV, mientras que para 500KHz ya son 18.4V. El generador de señales estaba configurado para entregar la máxima cantidad de voltaje en la salida durante toda la medición.

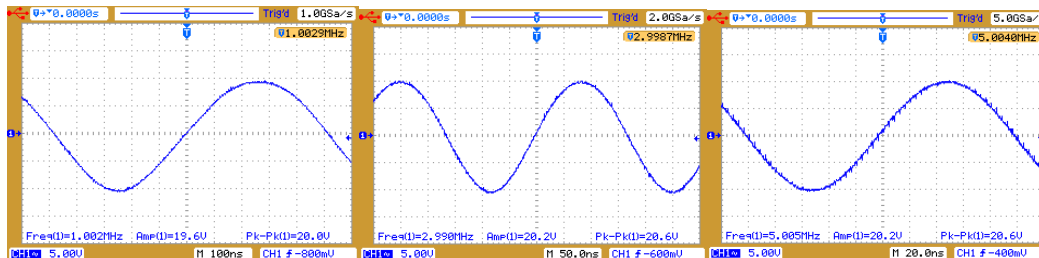


Ilustración 41 - 1MHz, 3MHz y 5MHz respectivamente.

Se llevó el generador de señales hasta la frecuencia máxima que podía entregar: 5MHz. En este punto el transformador seguía funcionando de manera bastante apropiada ya que a la salida es posible evidenciar una señal sinusoidal casi perfecta.

El comportamiento del prototipo diseñado es el esperado, la señal de entrada es muy parecida a la señal de salida para frecuencias altas (a partir de los 1.5KHz). Las tensiones de entrada y de salida también fueron muy similares: se usó el voltímetro para medirlas en distintas etapas de la toma de datos y entre la entrada y salida la variación permanecía entre 3mV y 5mV.

4 Simulación multifísica

Con el propósito de comprender más a fondo el funcionamiento interno del prototipo en desarrollo se realizaron una serie de simulaciones bajo distintas condiciones, haciendo uso del software COMSOL Multiphysics, con licencia de la UTP.

El desarrollo de esta sección está dividido en 6 subsecciones:

- Construcción de la geometría tridimensional
- Asignación de parámetros y variables
- Configuración del estudio: Campos Magnéticos y circuito eléctrico
- Asignación de materiales
- Generación del mallado
- Resultados

Se tomaron como referencia 2 presentaciones del sitio de COMSOL en las que se explica cómo realizar la simulación de un transformador monofásico con núcleo en E [26] que fueron complementadas con información de los blogs del mismo sitio.

4.1 Construcción de la geometría

La construcción de geometrías en una, dos y tres dimensiones es una de las potentes herramientas que ofrece el programa. Además de la creación de estas, también es posible exportarlas desde otros softwares como AutoCAD.

Se procedió inicialmente a construir el núcleo en 3D a partir de un plano bidimensional que posteriormente es *extrudido* (empujado en una dimensión ortogonal al plano con el fin de hacerlo tridimensional) teniendo en cuenta las medidas del núcleo del prototipo real que se muestra en la sección de construcción del prototipo.

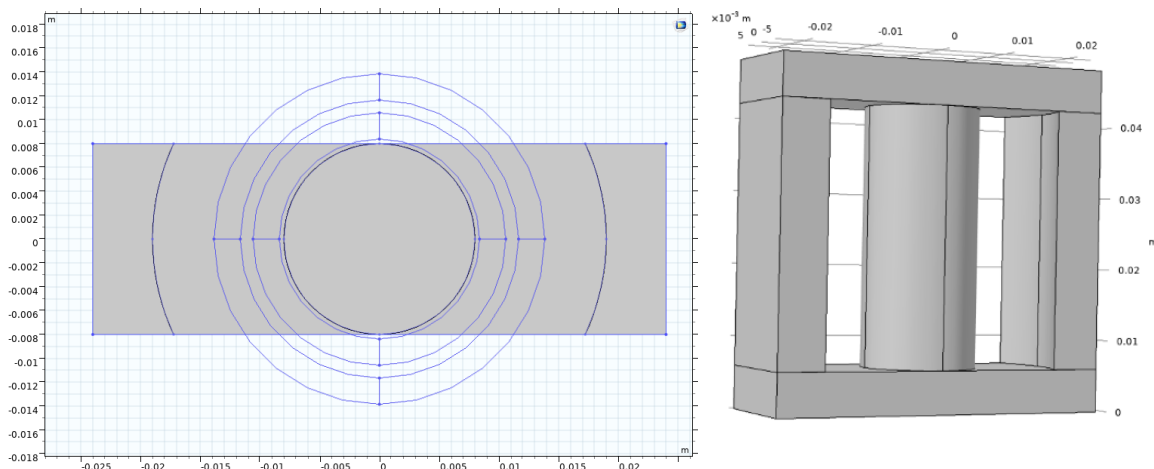


Ilustración 42 – Izquierda: Plano Núcleo, Derecha: Núcleo Extrudido. Tomadas de la simulación.

En la referencia que se usó, las tres patas del transformador son rectangulares. Para la realización de las patas exteriores, que tienen una curvatura observable en la Ilustración 42, se

generó inicialmente un rectángulo de 1.6 cm * 4.8 cm (tamaño actual de la base del núcleo) y un círculo de 3.8 cm de diámetro, que se calculó midiendo la distancia del extremo de la pata central a las externas (1 cm). Luego, mediante la operación *diferencia*, se le restó el círculo al rectángulo resultando en la geometría de las patas externas, que fueron entonces extrudidas 3.6 cm. Para la pata central bastó con generar un círculo de 1.6 cm de diámetro (tamaño actual) y extrudirlo de igual forma 3.6 cm.

Para las bases superior e inferior, se generó otro rectángulo del tamaño de la base real y se extruyó 0.6 cm, luego se duplicó y se desplazó 4.2 cm.

A continuación, se procedió a construir los devanados. Para ello, se pensó que era interesante buscar la forma de importar desde Illustrator la figura que se había realizado anteriormente, puesto que esta ya tendría los tamaños apropiados, el número de vueltas necesario y precisión en el diseño. Sin embargo, esto aumentó considerablemente la complejidad de la simulación debido a la forma particular, los hoyos y la falta de conexión entre devanados, lo cual no es recomendado en este tipo de aproximamientos, tal como se indica en las referencias utilizadas. Por esta razón, se decidió recurrir a figuras más simples, así, se crearon un par de espiras (que representan las dos vueltas de cada devanado) teniendo en cuenta, para los radios de estas, las distancias del centro a cada vuelta (10.58 y 11.65 mm respectivamente), con un grosor de 2.2 mm.

Para la extrusión, nos basamos en las dimensiones mostradas en la página de JLCPCB para el cobre, allí se indica que, para el tipo que ordenamos, el cobre tiene un grosor de 1 oz (las onzas son la medida más utilizada para grosor de cobre en PCBs), que equivale a 34.79 μm y que redondeamos a 35 μm para el renderizado 3d. Posteriormente, el par de devanados representando la espiral fue sextuplicado y puesto 6 mm entre sí, con una separación de 10 mm entre primario y secundario.

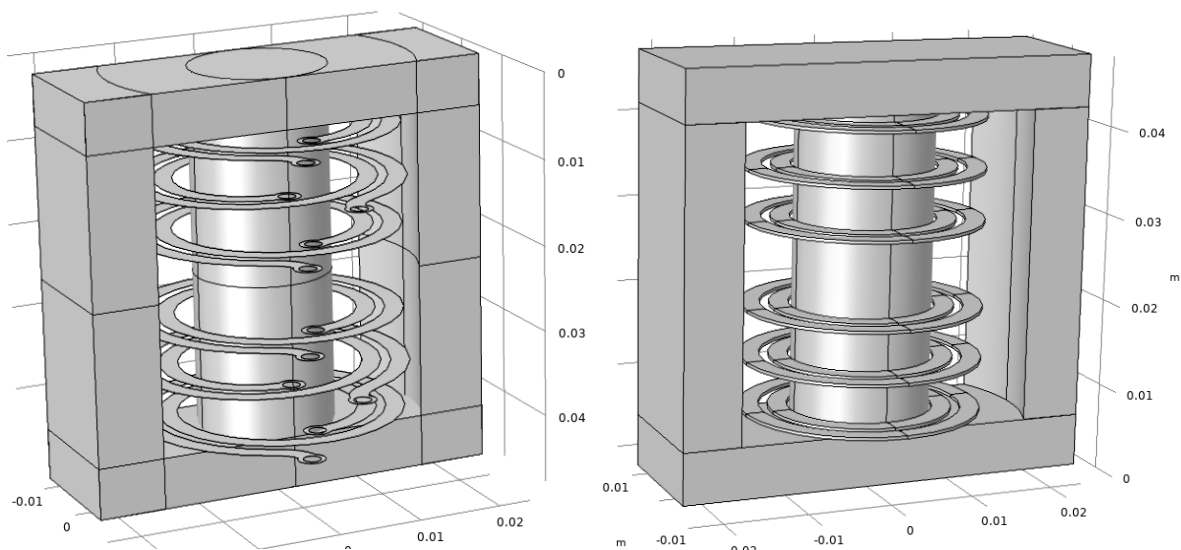


Ilustración 43 – Izquierda: Devanados importados desde Illustrator / Derecha: Devanados simplificados

Nota: En la versión de los devanados importados, que fue la primera versión, el diseño del núcleo tenía más formas (como se puede ver en la Ilustración 43), pues se realizó inicialmente una mitad que luego fue duplicada y que además tenía geometrías cruzadas entre sí. Esto aumentó la

complejidad del diseño resultante lo cual fue evidente al momento de realizar el mallado y la simulación, que tomaron algunas horas más que en las versiones posteriores, donde se simplificó la estructura realizándola como se explicó más arriba.

Finalmente, se realizó un bloque de 10 cm*10 cm *10 cm, que representa el aire, dentro del cual se situó el prototipo de transformador planar.

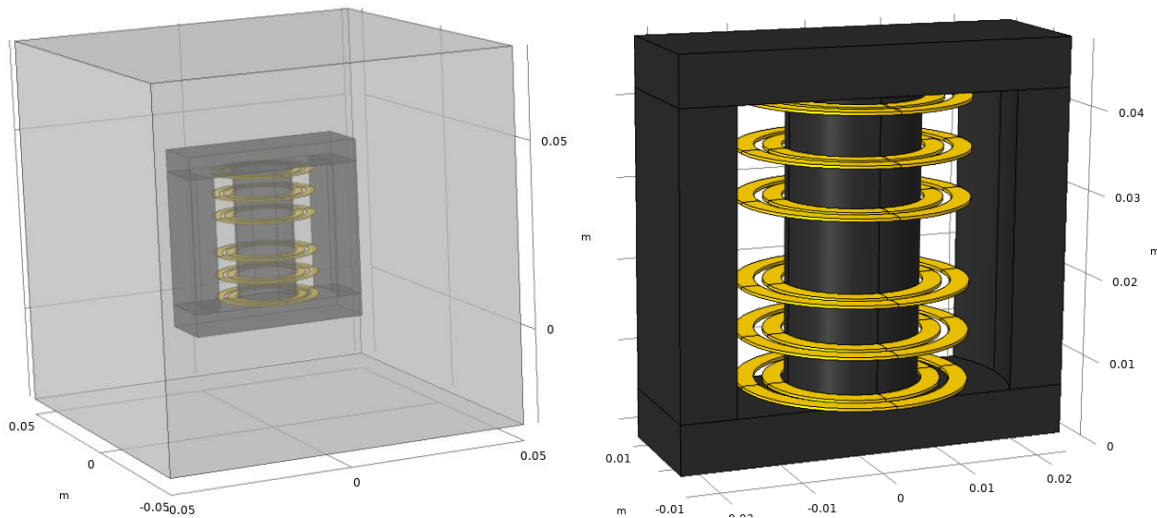


Ilustración 44 – Izquierda: Bloque de aire / Derecha: Geometría final del transformador.

4.2 Asignación de parámetros y variables.

La ventana de parámetros de la aplicación permite configurar, como su nombre lo indica, los parámetros que van a caracterizar el sistema a ser simulado. Algunos ejemplos de los tipos de parámetros que pueden ser configurados son: para operaciones con las geometrías (áreas, volúmenes), para generadores de malla, como un tamaño específico, para algunos aspectos del proceso de solución (como una tensión dentro de una ecuación), para evaluar rápidamente una expresión matemática o algún resultado, entre otros. [tomado de la sección Help: parameters]

Los parámetros globales que se configuraron en la geometría del transformador se muestran en la Ilustración 45.

Name	Expression	Value	Description
area	2.2[mm]*35[um]	7.7E-8 m ²	AreaTransversalDevanado
Rp	0.01[ohm]	0.01 Ω	ResistenciaPrimario
Rs	0.01[ohm]	0.01 Ω	ResistenciaSecundario
Np	6	6	NumeroVueltasPrimario
Ns	6	6	NumeroVueltasSecundario
w	(2*pi)[rad]*f	6283.2 Hz	FrecuenciaAngular
f	1000[Hz]	1000 Hz	Frecuencia
Vp	1[V]	1 V	Excitación

Ilustración 45 – Ventana de parámetros

Los parámetros utilizados para área, resistencias y números de vueltas fueron tomados del prototipo que se construyó físicamente con el objetivo de comparar resultados.

4.3 Configuración del Estudio: Campos Magnéticos y circuito eléctrico

Como simulador de variables multifísicas, Comsol ofrece varios tipos de análisis según las evaluaciones que se quieran realizar de un modelo en las que se pueden incluir a modo general estudios térmicos, eléctricos, químicos, magnéticos, físicos y combinaciones de estos que, entre más completo, más complejidad presentará a nivel de armonización, relación y tiempo de simulación.

Para la presente investigación se eligió la interfaz de Campos Magnéticos (Magnetic Fields), que es parte de la familia de interfaces de AC/DC. El estudio se realizó en un intervalo de 0 a 0.05 s, en pasos de 0.005s. La simulación de campos magnéticos es de interés al estudiar magnetos, motores, transformadores y conductores que lleven corrientes estáticas o alternas. [Tomado de la sección Help: Theory of Magnetic Fields]

Esta interfaz contiene varias subsecciones que permiten modificar parámetros característicos que varían según el análisis que se quiera realizar. Para nuestro caso, se aplicó la ley de Ampère a toda la geometría. El nodo de la Ley de Ampere añade esta ley para el campo magnético y provee una interfaz para la definición de la relación constitutiva y sus propiedades asociadas, así como las propiedades eléctricas [Tomado de la sección Help: Ampère's Law].

Luego de definir la interfaz que gobernará toda la geometría, se eligen nodos de la interfaz de Campos Magnéticos para caracterizar individualmente cada una de las partes. Se definió otro nodo de la ley de Ampere exclusivo para la geometría del núcleo para establecer una relación constitutiva de curva B-H (la relación por defecto es la de permeabilidad relativa) para usar la curva que relaciona el campo magnético H con la densidad de flujo magnético B mediante $|H| = f(|B|)$.

Para los devanados, se utilizaron varios nodos de tipo Bobina (Coil) que permiten personalizar aspectos de los devanados como el número de vueltas, el tipo de excitación, el punto donde entra la

corriente, el tipo de conductor, entre otros. Se asignaron en este punto los parámetros del prototipo de transformador: dos vueltas por devanado (definido anteriormente en la ventana de parámetros con N_p y N_s), conductor de tipo homogéneo y excitación por corriente.

Posterior a la configuración de los parámetros de campos magnéticos, se procedió a configurar un circuito eléctrico externo con el fin de agregar una fuente de tensión, y dos resistencias de igual valor que representan las pérdidas de los devanados. La interfaz de circuito eléctrico se usa para modelar corrientes y voltajes en circuitos que incluyen fuentes de tensión y corriente, resistores, capacitores, inductores y dispositivos semiconductores y se encarga de solucionar la ley de conservación de Kirchhoff para voltajes, corrientes y cargas asociadas con estos elementos. Al añadir esta interfaz, se añade un nodo tierra por defecto y se le asigna el nodo cero del circuito eléctrico. [Tomado de Help: The Electrical Circuit Interface].

4.4 Asignación de Materiales

Comsol cuenta con una extensa base de datos de materiales elásticos, sólidos, electromagnéticos, fluidos, químicos, térmicos, piezoeléctricos y piezoresistivos con sus propiedades respectivas. [Tomado de Help: Working with Materials] Para realizar una simulación aproximada de la realidad, le fueron asignados materiales de la biblioteca de Comsol a cada una de las partes de la geometría.

Inicialmente al bloque de aire, se le asignó el material del mismo nombre. Las propiedades por defecto se enuncian en la Ilustración 46.

▼ Material Contents					
»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permeability	mu_r	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Electrical conductivity	sigma	10[S/m]	S/m	Basic
	Dynamic viscosity	mu	eta(T[1/...	Pa·s	Basic
	Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
	Heat capacity at constant pres...	Cp	Cp(T[1/...	J/(kg·K)	Basic
	Density	rho	rho(pA[...	kg/m ³	Basic
	Thermal conductivity	k_iso ;...	k(T[1/K]...	W/(m·...	Basic
	Speed of sound	c	cs(T[1/K...	m/s	Basic
	Refractive index, real part	n_iso ;...	1	1	Refractive index
	Refractive index, imaginary part	ki_iso...	0	1	Refractive index

Ilustración 46 - Propiedades del material: Aire

Luego, para la ferrita, se escogió el material “Alloy Powder Core Ferrite” que fue el único disponible en la biblioteca del software al buscar “Ferrite” y cuyas características de baja conductividad eléctrica y baja permitividad relativa son deseables para un aproximamiento apropiado. Las otras características, como se puede ver en la sección “Value” son tomadas en su

mayoría de la curva B-H que fue asignada con anterioridad a la geometría del núcleo, a excepción de la resistividad que se añadió con base en [21], con un valor de 2 $\Omega \cdot m$.

▼ Material Contents					
»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Electrical conductivity	sigma...	1e-12[M...	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permittivity	epsilo...	1[1]	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Magnetic field norm	normH	BHCurv...	A/m	B-H curve
<input checked="" type="checkbox"/>	Magnetic coenergy density	Wpm	BHCurv...	J/m ³	B-H curve
	Resistivity	res_is...	2[ohm*m]	$\Omega \cdot m$	Basic
	Magnetic field norm	normH	HBCurv...	A/m	H-B curve
	normB	normB	sqrt(B1...	T	H-B curve
	Magnetic flux density norm	normB	BHCurv...	T	B-H curve
	normHin	norm...	sqrt(H1...	A/m	B-H curve
	normBin	norm...	sqrt(B1...	T	B-H curve

Ilustración 47 - Propiedades del material: Alloy Powder Core Ferrite

Para los devanados, se escogió el cobre (Copper) como material. De este había bastantes variaciones, pero se escogió la básica con el fin de simplificar el modelo.

▼ Material Contents					
»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permeability	mur_is...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permittivity	epsilo...	1	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma...	5.998e7[...	S/m	Basic
	Heat capacity at constant pres...	Cp	385[J/(k...	J/(kg·K)	Basic
	Surface emissivity	epsilo...	0.5	1	Basic
	Density	rho	8940[kg...	kg/m ³	Basic
	Thermal conductivity	k_iso ;...	400[W/(...	W/(m·...	Basic
	Young's modulus	E	126e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Po
	Poisson's ratio	nu	0.34	1	Young's modulus and Po
	Reference resistivity	rho0	1.667e-...	$\Omega \cdot m$	Linearized resistivity
	Resistivity temperature coeffic...	alpha	3.862e-...	1/K	Linearized resistivity
	Reference temperature	Tref	293.15[K]	K	Linearized resistivity

Ilustración 48 - Propiedades del material: Cobre

4.5 Generación del mallado

Para el mallado se intentaron varias aproximaciones debido a la variedad en las distintas formas y tamaños del transformador. Una sola malla para toda la geometría no era conveniente dado que el grosor del núcleo con respecto al de los devanados es considerablemente diferente teniendo el primero grosores de hasta 1.6 cm en comparación con 35 μm del segundo. Es por ello que se hicieron dos tipos de mallado diferentes: Uno para el núcleo calibrado para geometrías físicas generales (General Physics) y otro para los devanados, calibrado para semiconductores (Semiconductor), en este último el tamaño mínimo de los elementos es menor. Para ambos casos, la malla fue compuesta de tetraedros libres, tal como se realizó en [26].

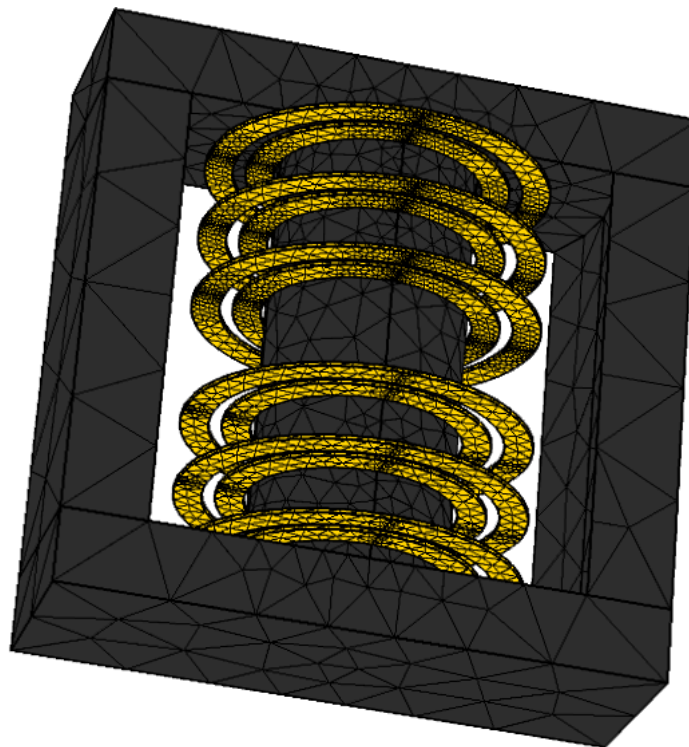


Ilustración 49 - Mallado con tetraedros libres

4.6 Resultados de la simulación.

Luego de tener el estudio y sus parámetros listo, se corre la simulación con el fin de evidenciar como interactúan las distintas variables configuradas del sistema entre sí y con la geometría. Esta rama contiene herramientas para el post-procesamiento y análisis de resultados de las simulaciones, que incluyen visualizaciones, animaciones, análisis de datos y reportes. [Tomado de Help: Results Overview]

Se realizaron en total diez versiones debido a los constantes cambios que se realizaban a causa de los errores de simulación, de la necesidad de simplificar el diseño, o de cambiar/eliminar/agregar parámetros en el sistema. En las distintas versiones ninguna de las simulaciones tomó menos de 10 horas, tomando 12,4 horas la versión definitiva en un computador con procesador Intel Core i7 de 3.60 GHz, 8 GB de memoria RAM, tarjeta gráfica AMD Radeon HD 7970 y sistema operativo Windows 10 de 64 bits.

El estudio fundamental que se realizó fue el de Campos Magnéticos (Magnetic Fields) cuyo resultado muestra la densidad de campo magnético en la geometría donde fue realizado el estudio, teniendo en cuenta los elementos asociados a esta, que en este caso son: los materiales asignados, el circuito eléctrico conectado para simular la fuente de tensión y las pérdidas en los devanados y sus propias restricciones magnéticas.

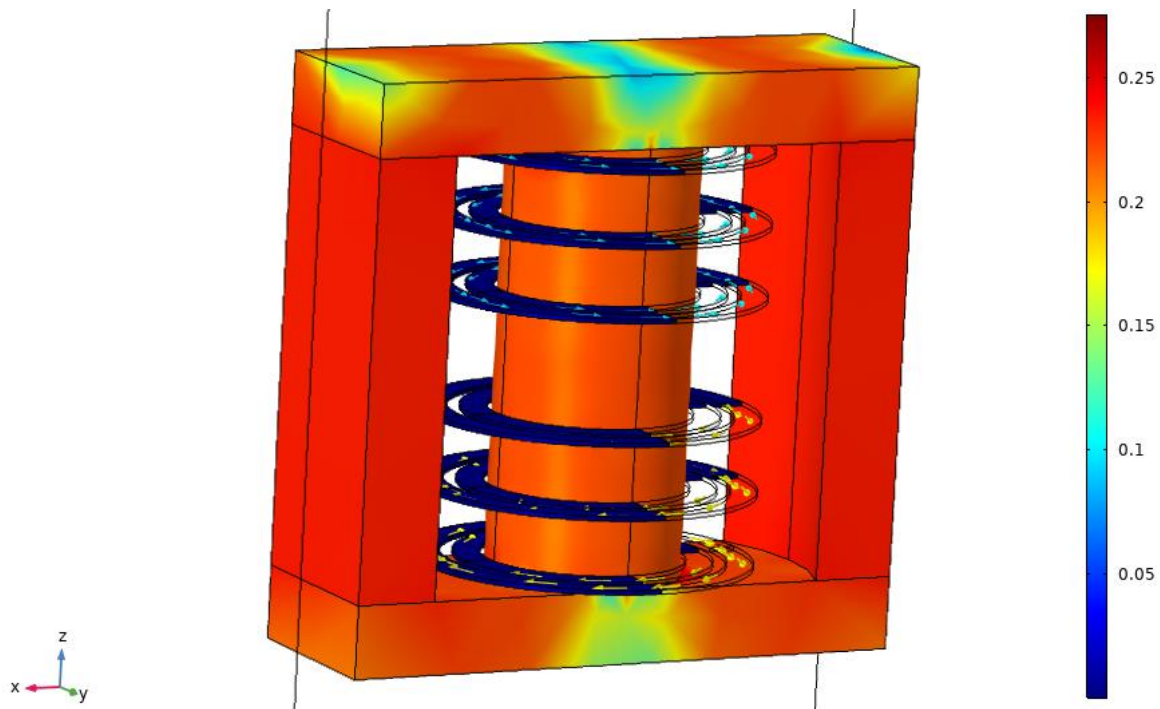


Ilustración 50 - Gráfico de Intensidad de flujo magnético

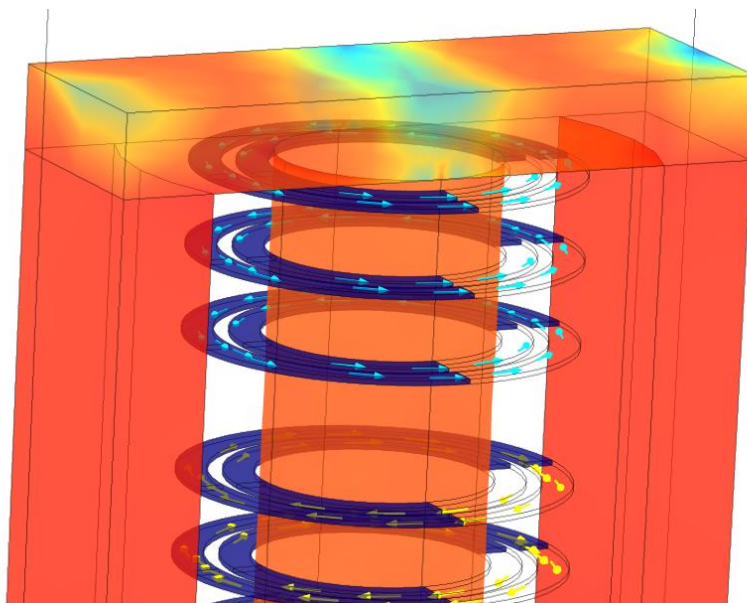


Ilustración 51 - Gráfico con transparencia: Dirección de corriente en los devanados

Los gráficos de las ilustraciones anteriores representan el estado del transformador en el tiempo $t=0.05s$.

El núcleo se encarga concatenar el flujo magnético en casi la totalidad de su área, aproximándose a valores de 0.25 T en los puntos más álgidos. En la Ilustración 51 se hace zoom al gráfico y se aplica transparencia para apreciar la dirección de la corriente en ambos devanados.

5 Conclusión

La investigación realizada en las distintas fuentes permitió alcanzar una comprensión específica del transformador planar, y las diversas aplicaciones que este tiene. Se descubrió que es un dispositivo sobre el que se realiza investigación desde hace casi 5 décadas, tiempo en el cual ha evolucionado y se ha expandido a muchas áreas de la ingeniería, además de tomar cada vez más relevancia por sus características técnicas.

Se realizó un prototipo del transformador con relación de transformación 1:1, con 3 PCBs para primario y secundario como devanados, con dos vueltas cada uno. Se explicó el proceso de consecución y construcción de los núcleos, las tarjetas PCB y el cableado estructural. Se pusieron a prueba en el laboratorio y se obtuvieron los resultados esperados: En la salida se evidenció casi en su totalidad la misma señal aplicada a la entrada, para frecuencias a partir de 800Hz.

Se utilizó el software COMSOL Multiphysics para realizar la simulación del prototipo y ver el comportamiento magnético (especialmente del núcleo) del transformador, lo cual se logró al cabo de 10 versiones que fueron depuradas a medida que se encontraron oportunidades de mejora. Se explica en esta sección el paso a paso del proceso y puntos importantes para el aprendizaje.

Como trabajo futuro, es importante la realización de más prototipos y simulaciones que permitan evidenciar más a fondo el comportamiento del transformador mediante de modificaciones como: la reducción de los espacios entre los devanados, la variación del numero de vueltas y la relación de transformación, la experimentación con núcleos de tamaños y formas diferentes, como los de pata central cuadrada o incluso los de tipo meandro. Estos desarrollos permitirán a la comunidad interesarse más por la investigación de este dispositivo debido a los resultados físicos que se pueden obtener que significan, basados en los papers utilizados para este documento, menos pérdidas, mejor concatenación de los flujos, mejor uso del área efectiva, mejor control de la temperatura, mayor densidad de potencia y por supuesto, mayor eficiencia.

6 Referencias

- [1] C. Francisco, «James Clerk Maxwell,» pp. 3-11.
- [2] G. E. Gómez Pedro, «Ecuaciones de Maxwell,» Madrid, 2012.
- [3] M. Vázquez, Materiales Magneticos, Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A., 2002.
- [4] C. K. J. S. D. U. A. E. Fitzgerald, Máquinas Eléctricas, Mc Graw Hill, 2009.
- [5] A. M. Alvaro, «Concepto De Circuito,» de *Circuitos Eléctricos*, Pereira, 2015, pp. 37-43.
- [6] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Madrid: Concepción Fernandez Madrid, 2003.
- [7] D. G. F. & H. W. Beatty, Standard Handbook for Electrical Engineers, 11th Edition, McGraw Hil, 1978.
- [8] R. Dreapeau, «A Wide Bandwidth, High-Ratio, Planar Transmission-Line Transformer for Use at Cryogenic Temperatures,» *IEEE Transactions on magnetics*, pp. 64 - 71, 1967.
- [9] A. Estrov y E. Rodriguez, «Switching electrical power supply utilizing miniature inductors integrally in a PCB». Massachusetts Patente 4,622,627, 16 Febrero 1984.
- [10] H. T. K. S. O. Oshiro, «Structures and Characteristics of Planar Transformers,» *IEEE TRANSLATION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN, VOL 3*, pp. 543 - 544, 1988.
- [11] Payton Planar, «<http://www.paytongroup.com/>,» Payton Group, 2013. [En línea]. Available: http://www.paytongroup.com/What_is_Planar_Technology. [Último acceso: Mayo 2019].
- [12] S. Ben-Yaakov, «The Benefits of Planar Magnetics,» Ben-Gurion University of the Negev, Israel, 2000.
- [13] Universidad de Navarra, *Diseño y fabricación de un transformador monofásico*, Navarra , 2009.

- [14] V. Gurusamy, «Design and analysis of integrated planar transformer for LLC converter,» Texas, 2018.
- [15] S. S. L. N. Kumar Vijaya, «Analysis and Design Methodology for planar transformer with low self-capacitance used in high voltage flyback charging circuit,» *IEEE*, p. 5, 2016.
- [16] Marcel Dekker, «Chapter 20 Planar Transformers,» de *Transformer and Inductor design handbook*, Marcel Dekker, 2004, p. 19.
- [17] Pulse Engineering inc., «Pulse Electronics,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.pulseelectronics.com/>. [Último acceso: 22 05 2019].
- [18] J. S. Ngoua Teu, R. Bakri, X. Margueron, P. LeMoigne, S. Guguen, A. Mahe y T. Bensalah, «Planar Magnetic Components in More Electric Aircraft: Review of technology and key parameters for DC-DC Power electronic converter,» *HAL Archives Ouvertes*, p. 14, 2018.
- [19] A. Ammouri, H. Belloumi, T. Ben Salah y F. Kourda, «High Frequency Investigation of Planar Transformers,» *IEEE*, p. 5, 2014.
- [20] C. Ropoteanu, P. Svasta y C. Ionescu, «A Study of losses in Planar Transformers with different layer structure,» *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, p. 4, 2017.
- [21] S. Djuric, G. Stojanovic, M. Damnjanovic, M. Radovanovic y E. Laboure, «Design, modeling and analysis of a compact planar transformer,» *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 48, nº 11, p. 4, 2012.
- [22] S. M. Djuric y G. M. Stojanovic, «A compact Planar Transformer with an improved winding configuration,» *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 50, nº 11, p. 4, 2014.
- [23] J. K. J. Biela, «Electromagnetic Integration of High Power resonant circuits comprising high leakage inductance transformers,» de *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aquisgrán, Alemania, 2004.
- [24] F. Alam, Z. Ullah, A. Majid, J. Salem y A. Haider, «Design of High Frequency Planar Pot Core Transformer,» *IEEE*, p. 6, 2018.
- [25] JLCPCB, «JLCPCB,» [En línea]. Available: <https://jlcpcb.com/>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [26] COMSOL Multiphysics, «COMSOL Multiphysics,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/model/e-core-transformer-14123>. [Último acceso: Agosto 2019].